



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Física

## PROYECTO FIN DE CARRERA

### *Integración Hardware y Software de Nuevos Procedimientos de Medida Remota Mediante Imagen Espectral Infrarroja.*

*Aplicación a la Medida Precisa de la Temperatura y la Visualización de  
Gases.*

Autor: Manuel Rodrigo Morales Merchán

Tutor: Fernando López Martínez

Director: Francisco Cortés Martínez

Leganes, Junio de 2014



Título: Integración Hardware y Software de Nuevos Procedimientos de Medida Remota mediante Imagen Espectral Infrarroja. Aplicación a la Medida Precisa de la Temperatura y la Visualización de Gases.

Autor: Manuel Rodrigo Morales Merchán

Director: Francisco Cortés Martínez

Tutor: Fernando López Martínez

EL TRIBUNAL

Presidente: Juan Mélendez Sánchez

Vocal: Susana Briz Pacheco

Secretario: Fernando Hernández Jiménez

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 23 de Julio de 2014 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



## Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas esas personas que se alegran y deseaban que llegase este día tanto como lo he deseado yo.

Pero me gustaría hacer un hueco especial en este proyecto a mi familia que me ha animado a lo largo de todos mis años de carrera. A mi novia que ha sufrido más que nadie esperando que terminase el proyecto.

No me puedo olvidar de todos mis compañeros de trabajo de los últimos años y sobre todo a mis compañeros del parque tecnológico.

También quiero agradecer a Fran y Fernando su paciencia y su ayuda sin la cual esto no sería posible.

*Gracias*



## Resumen

El LIR Infrared Lab de la Universidad Carlos III de Madrid (en adelante: LIR-UC3M), es un grupo de investigación dedicado al análisis de la interacción radiación-materia en el espectro infrarrojo. En dicho grupo se desarrolla una actividad científica de vanguardia en el campo de la espectro-radiometría y los sensores de infrarrojo. Fruto de dicha actividad, se han publicado numerosos artículos de gran impacto y se han desarrollado soluciones para la industria en campos tan diferentes como el aeroespacial, el medioambiental, la seguridad, etc.

Este proyecto se enmarca en la línea de desarrollo de sensores para aplicaciones específicas que sostiene el LIR-UC3M y por tanto, para su desarrollo, se ha tenido acceso a la instrumentación más avanzada en análisis espectral y espacial del escenario infrarrojo.

En este proyecto se aborda la ingeniería de sistemas de un sistema de imagen infrarroja. Desde la selección de componentes hasta el desarrollo del software de adquisición y tratamiento de imagen. El objeto general del proyecto es establecer un procedimiento general para el desarrollo de un sistema infrarrojo para aplicaciones específicas, donde los sistemas de propósito general no cumplen los requisitos.

La selección del hardware busca una mayor capacidad de adaptación a diferentes escenarios de medida y aplicaciones de distinta índole. Intentando encontrar un compromiso entre prestaciones y coste. Para ello, también, se cuenta con procedimientos de filtrado espectral de la radiación en función de la aplicación.

La parte software se convierte en un punto clave en el tratamiento de imagen infrarroja ya que contiene los algoritmos que permiten obtener los resultados de interés. Como ejemplos de aplicación a lo largo se desarrolla un software para la realización de termografía a largas distancias y otro para la visualización de gases. Por otra parte se ha desarrollado una base de software modular donde se puedan añadir nuevas funcionalidades de forma simple.





# Introducción

La tecnología infrarroja, tal y como la conocemos hoy en día, tiene su origen en el análisis químico de compuestos y sobretodo en la industria militar. En los últimos 10 años diferentes industrias y sectores profesionales están incorporando esta tecnología. No obstante, el alcance es aún enorme. Las posibilidades y beneficios que presenta el infrarrojo son numerosas y variadas y van desde el análisis preventivo, hasta el control de calidad de productos, pasando por análisis de eficiencia energética, imagen médica, medioambiente, etc.

Al margen de las bondades de la tecnología aún tiene un hándicap muy importante respecto a otras tecnologías alternativas: su elevado coste. Si bien es cierto que el precio se ha visto reducido en los últimos años, su relación coste/beneficio, es aún pobre en muchas aplicaciones.

Actualmente, existe en el mercado una gran oferta de sistemas de propósito general que, para muchas aplicaciones, son eficaces y válidos. Pero para otros muchos las soluciones ofrecidas, por estos sistemas comerciales, no son óptimas y por tanto es necesaria una particularización tecnológica a la aplicación, es decir, soluciones específicas. El Infrared-Lab de la Universidad Carlos III de Madrid (LIR), donde se ha desarrollado este Proyecto Fin de Carrera, sostiene diversas líneas de investigación en el campo de los sensores de infrarrojo aplicados a diferentes sectores: medioambiente, aeroespacial, industrial, transporte, seguridad, etc. Con el factor común de investigar y desarrollar soluciones específicas mediante la combinación de resolución espacial y espectral.

# Objetivos

Este proyecto tiene dos objetivos principales.

1. Seleccionar y determinar componentes y dispositivos de imagen espectral infrarroja con alta capacidad de integración, sobre los cuales implementar las soluciones desarrolladas por el grupo a nivel científico.
2. Definir y desarrollar un software versátil para el procesado de la imagen infrarroja en tiempo real, adaptado a las necesidades del grupo  
Concretamente las aplicaciones en las que se basará el proyecto son:
  - Termografía de precisión (2% de incertidumbre en la medida de temperatura) de largo alcance (> 200 m)
  - Visualización de fugas de gases.

## *Planteamiento del problema de termografía de precisión a largas distancias*

La termografía habitual es aplicada en escenarios más o menos simples en los que el blanco se encuentra a una distancia relativamente cercana (pocos metros) al instrumento y un rango de temperaturas corto. Pero el caso que buscamos resolver en este proyecto tiene una serie de requisitos añadidos.

Rango dinámico de 300 a 700°C

Distancia del objeto superior a 200 metros

Resolución del pixel superior a 3 cm

El equipo debe funcionar en exteriores

Largos periodos de funcionamiento continuo

Minimizar las fuentes de error del sistema

Visualización de imagen simultáneamente a la adquisición

Minimizar los costes

### *Planteamiento del problema de detección de fugas de gases*

La detección de gases es una de las muchas aplicaciones que tiene la tecnología infrarroja. Es de especial interés en la industria debido a los grandes costes económicos y medioambientales que pueden producir. En este proyecto se busca:

Mejorar los límites actuales de detección.

La búsqueda de nuevos gases susceptibles de ser observados en infrarrojos.

Abaratamiento de los costes.



## Índice

1.	Introducción al infrarrojo.....	3
1.1.	El espectro electromagnético.....	3
1.2.	Una breve introducción a la radiometría infrarroja .....	5
1.3.	El cuerpo negro y las leyes fundamentales .....	7
1.4.	Gases, selección espectral .....	10
2.	Componentes de un sistema de imagen infrarroja .....	11
2.1.	Óptica.....	11
2.2.	Detectores infrarrojos .....	12
3.	Procedimiento general para la medida cuantitativa en infrarrojo.....	14
3.1.	Introducción a la termografía infrarroja.....	14
3.2.	Modelo de transferencia radiativa .....	15
3.3.	Calibración del sistema y medida de la temperatura.....	18
4.	Plataforma de desarrollo software .....	24
4.1.	LabVIEW.....	24
4.2.	Entorno de desarrollo.....	24
5.	Ingeniería de Sistemas e Integración. Aplicación a medida de temperatura y visualización de gases.....	29
5.1.	Desarrollo hardware.....	29
5.2.	Aplicación a Termografía a larga distancia.....	36
5.3.	Aplicación de visualización de gases .....	48
5.4.	Desarrollo Software .....	49
5.5.	Desarrollo software multifuncional.....	58
6.	Campaña de medidas y validación .....	65
6.1.	Termografía a largas distancias .....	65
6.2.	Detección de fuga de gases .....	66

7.	Conclusiones y trabajos futuros.....	68
7.1.	Conclusiones.....	68
7.2.	Trabajos futuros.....	69
8.	Bibliografía .....	70
9.	Anexo I: Presupuesto económico .....	72
10.	Anexo II: Detector Infrarrojo.....	73
11.	Anexo III: Óptica 210mm .....	75
12.	Anexo IV: Óptica 35mm .....	76

# 1. Introducción al infrarrojo

---

La radiación infrarroja fue descubierta 1880 por el astrónomo Sir Frederick William Herschel cuando notó que la cantidad de calor que pasaba del sol a través de distintos filtros coloreados variaba. Para poder comprobar mejor este efecto, Herschel, diseñó un experimento para comprobar su teoría: Hizo pasar un rayo de luz por un prisma y de esta forma descomponer la luz solar en todo su espectro formando, así, un arcoíris (1). Luego midió la temperatura correspondiente a cada color y observó que, la temperatura, iba subiendo del violeta al rojo, pero más sorprende aún era que la temperatura más alta se encontraba al colocar el termómetro una vez sobrepasado el rojo. De esta forma descubrió la radiación infrarroja.

El desarrollo de esta tecnología se ha visto enmarcado a lo largo de la historia en el terreno militar. Pero los avances producidos en este campo y la reducción de sus costes han permitido que esta tecnología se expanda a otros ámbitos, como la industria, la medicina o la investigación científica.

Actualmente, existen numerosos estudios de mercado que apuntan a un crecimiento de más de un 23% hasta 2018 (2)

## 1.1. El espectro electromagnético

Se entiende como espectro electromagnético la distribución del conjunto de ondas electromagnéticas en función de su frecuencia o longitud de onda como muestra la Figura 1.1-1.

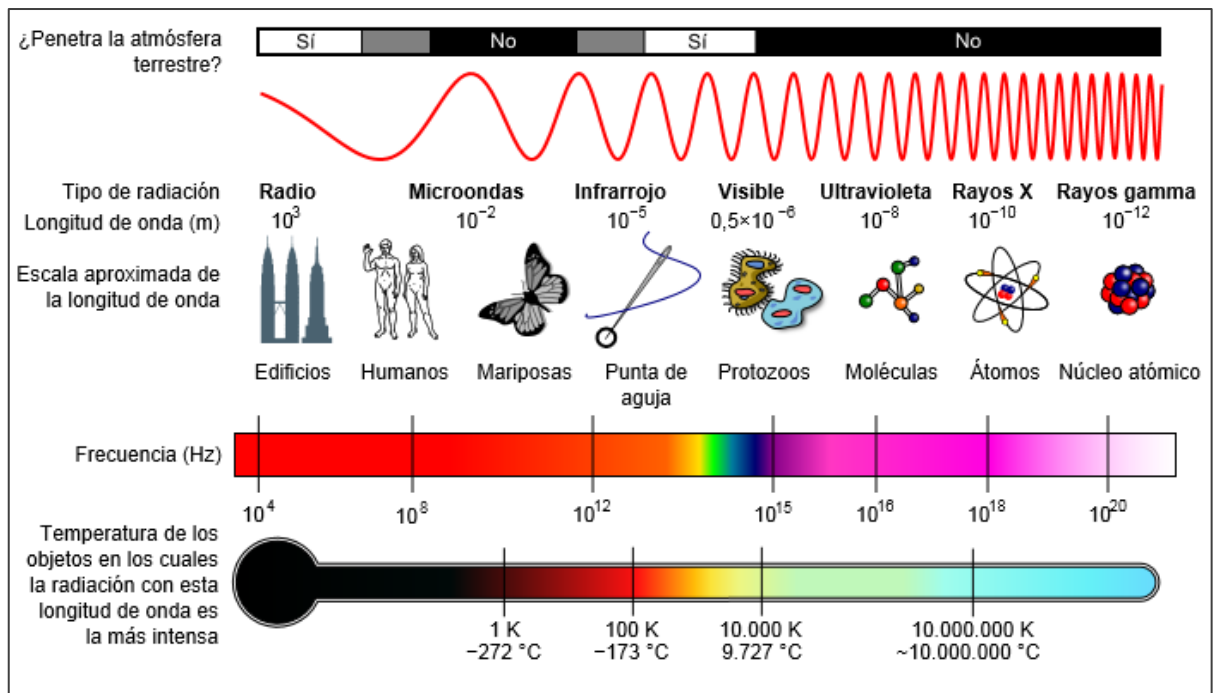


Figura 1.1-1 Espectro electromagnético (3)

El espectro electromagnético comprende desde longitudes de onda corta (rayos gamma) hasta las longitudes de onda largas como las ondas de radio. Dentro de todo el espectro electromagnético se encuentra la región óptica, que comprende la radiación visible y a longitudes de onda un poco más largas encontramos la región de radiación infrarroja (IR) que va desde los 700nm hasta 1mm, la cual se suele subdividir en las siguientes partes.

- Infrarrojo cercano (Near InfraRed , NIR): 0.75-3  $\mu\text{m}$ ,
- Infrarrojo medio (médium InfraRed, MIR): 3-6  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo lejano (Large InfraRed, LIR): 6-15  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo extremo ( Xtreme InfraRed, XIR): 15-1000  $\mu\text{m}$



Como podemos ver en la Figura 1.1-2 estas subdivisiones del espectro IR se ven limitadas por la transmitancia atmosférica o por lo que es lo mismo las regiones en las que la atmósfera es transparente a la radiación infrarroja, por ello a la hora de hablar de infrarrojo solemos hablar de las siguientes regiones (4), también conocidas como ventanas del infrarrojo:

- NIR 0.7-2.5  $\mu\text{m}$ , infrarrojo cercano
- MIR: 3-5  $\mu\text{m}$ , infrarrojo medio
- TIR: 7.5-14  $\mu\text{m}$ , infrarrojo térmico o lejano

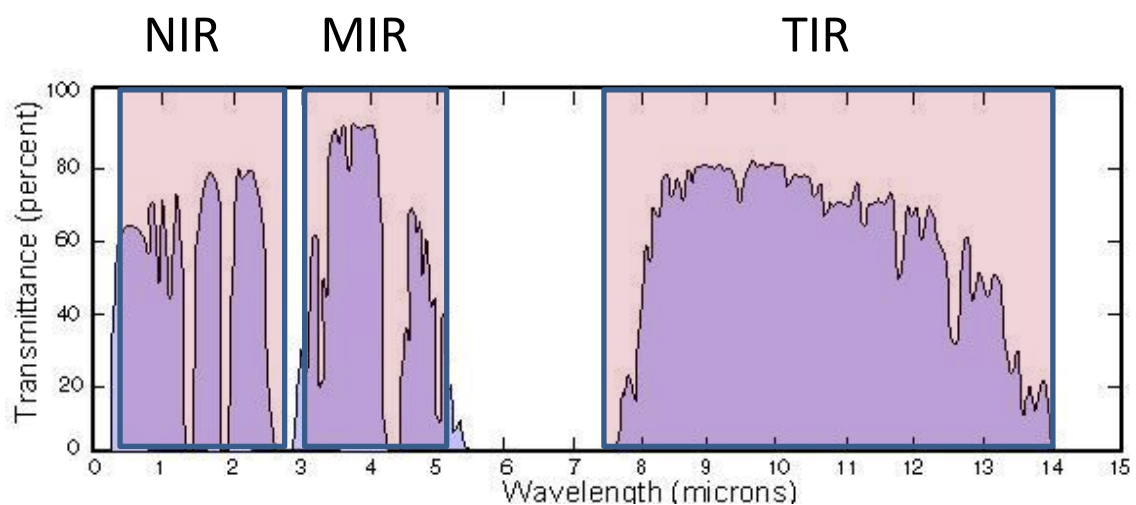


Figura 1.1-2 Espectro electromagnético de la atmósfera

## 1.2. Una breve introducción a la radiometría infrarroja

En el presente capítulo se pretende hacer una compilación de algunos conceptos sobre radiometría de tal forma que permita entender mejor los trabajos desarrollados a lo largo del proyecto (1).

El objetivo habitual de la radiometría suele ser estimar la transferencia de energía radiada por una determinada fuente conocida sobre un detector. O por el contrario, el problema inverso: conocer la energía o potencia radiada por una fuente a partir de la energía o potencia detectada.

La magnitud radiométrica más adecuada para el planteamiento de los procesos de transferencia radiativa es la radiancia  $L$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr}$ ]. El motivo de su idoneidad es que,

representa la potencia radiante normalizada a la superficie y al ángulo sólido, esta magnitud no variará si varía el tamaño de la fuente o el ángulo de observación (1).

### 1.2.1. Definición de radiancia

La radiación emitida por un objeto y que llega al detector se puede describir como los rayos que emite a cierta energía. Podemos decir entonces que la radiancia es la medida de estos rayos. Se define radiancia como.

$$L(x, y, \theta, \phi) = \frac{d^2\Phi(x, y, \theta, \phi)}{d\Omega(\theta, \phi)dA(x, y)\cos\theta} [W/m^2sr] \quad (1.2-1)$$

Donde  $d^2\phi$  es la potencia radiante emitida o detectada, es diferenciada por el ángulo sólido y el área proyectada ya sea del emisor o del receptor. Por tanto la potencia radiante emitida o detectada por una superficie será.

$$\Phi = \int_A \int_{\Omega} L \cos\theta dA d\Omega \quad (1.2-2)$$

Si integramos solo respecto al área de una fuente podemos obtener su intensidad y si lo hacemos sobre la hemiesfera de una superficie emisora obtenemos su exitancia.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int_A L \cos\theta dA \quad (1.2-3)$$

$$M = \frac{d\Phi}{dA} = \int_{\Omega} L \cos\theta d\Omega \quad (1.2-4)$$

Cabe destacar que los cuerpos negros y grises en su mayoría se pueden considerar como fuentes lambertianas, es decir, fuentes en las que se produce una disminución lineal de la intensidad con el coseno del ángulo respecto a la incidencia normal en la que se obtiene el valor máximo.

$$I_{\theta} = I_n \cos\theta [W/sr] \quad (1.2-5)$$

El comportamiento de la mayoría de las superficies se puede considerar lambertiano, pero por otro lado, las superficies que contengan brillos o materiales reflectantes no pueden considerarse dentro de esta categoría.

Una de las propiedades que presentan estas superficies lambertianas es que la radiancia es independiente del ángulo sólido y podemos expresar la radiancia de forma proporcional a su exitancia, (1) .

$$L = \frac{M}{\pi} [W / m^2 sr] \quad (1.2-6)$$

### 1.3. El cuerpo negro y las leyes fundamentales

Todo cuerpo con una temperatura superior a cero absoluto emite ondas electromagnéticas, debido a la vibración de las propias partículas que componen el objeto. Por ello la energía emitida dependerá principalmente de la temperatura del objeto.

Se define la radiación de un cuerpo negro (CN) como la radiación emitida por un cuerpo que absorbe toda la radiación incidente. La ecuación que define de forma espectral la radiación de un cuerpo negro es conocida como Ecuación de Planck (1.3-1) de cuerpo negro (5).

$$E(\lambda, T)_{CN} = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1]} [W / cm^2 \cdot \mu m] \quad (1.3-1)$$

Dónde:

- $\lambda$  en  $\mu m$
- T en kelvin
- $C_1 = 3.7418 \cdot 10^4 W \cdot \mu m^4 / cm^2$
- $C_2 = 1.4388 \cdot 10^4 \mu m \cdot K$

#### 1.3.1. Ley de Wien

Como podemos observar en la *Figura 1.3-1* la radiación de un cuerpo negro a diferentes temperaturas tienen un máximo para longitudes de ondas distintas, a

mayores temperaturas el máximo se va desplazando a longitudes de onda menores. La longitud de onda a la cual se aprecia el máximo viene dada por la *ley de Wien* (1.3-2).

$$\lambda_{\max} = \frac{2897.8}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad (1.3-2)$$

Donde T es la temperatura del cuerpo negro en kelvin.

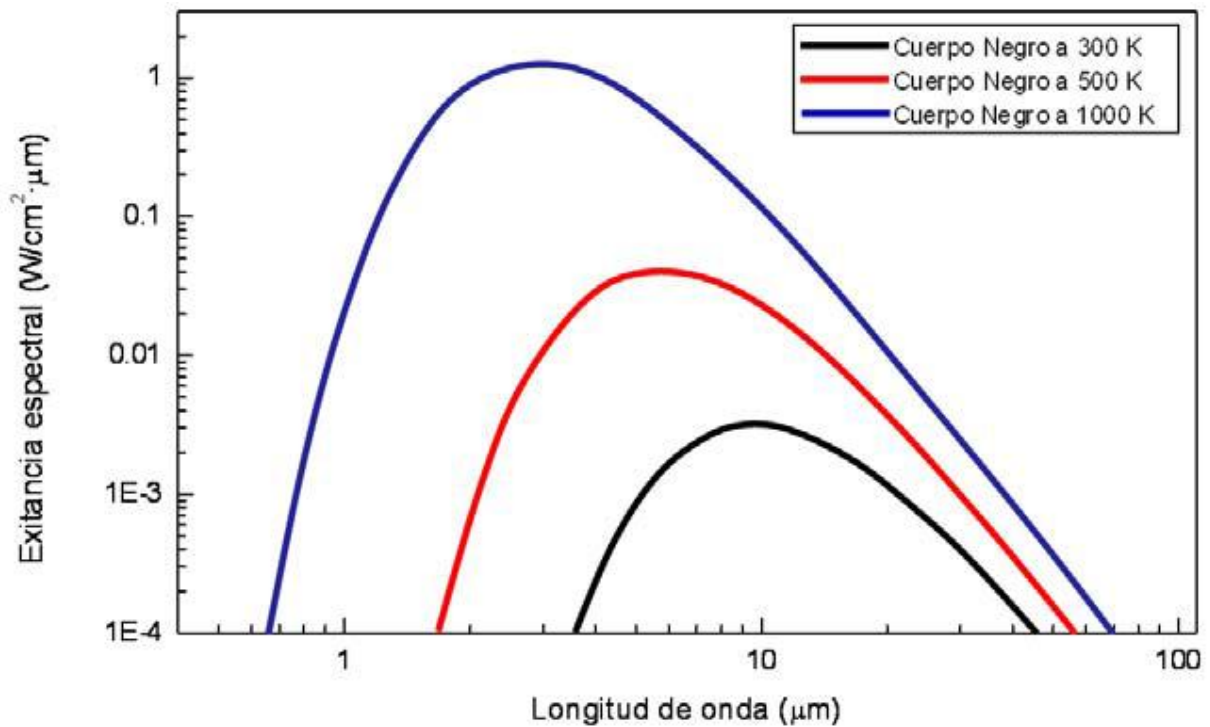


Figura 1.3-1 Representación espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas

### 1.3.2. Ley de Stefan-boltzmann

La ley de Stefan-Boltzmann (1.3-3) relaciona la radiación emitida por un cuerpo negro y su temperatura. La radiación del cuerpo negro se obtiene integrando la *ley de planck* (1.3-1).

$$E = \sigma T^4 \quad (1.3-3)$$

Siendo  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.6697 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$ )

### 1.3.3. Emisividad

Kirchhoff estableció que el cuerpo negro es una idealización de un radiador perfecto. Pero lo que normalmente observamos no se puede considerar un cuerpo

negro y hace falta introducir un nuevo valor llamado *Emisividad*  $\varepsilon$ . La emisividad es la relación entre la radiación teórica de un cuerpo a una temperatura dada y la radiación real que emite el cuerpo a estudio.

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{E(\lambda, T)_{CN}}{E(\lambda, T)} \Rightarrow 0 \leq \varepsilon(\lambda) \leq 1 \quad (1.3-4)$$

Hemos definido la *Emisividad* como una constante adimensional, que puede variar con la temperatura y la longitud de onda, con esto podemos definir tres casos.

- Cuerpo negro:  $\varepsilon=1$  y constante con  $\lambda$
- Cuerpo gris:  $\varepsilon<1$  y constante con  $\lambda$
- Cuerpo selectivo:  $\varepsilon<1$  y variable con  $\lambda$

#### 1.3.4.Ley de kirchhoff

A la hora de analizar un objeto debemos tener en cuenta que en este se puede producir tres fenómenos distintos, que la energía sea: transmitida, transmitancia ( $\tau$ ); reflejada, reflectancia ( $\rho$ ); o absorbida, absortancia ( $\alpha$ ) (5). Mediante la ley de conservación de la energía podemos escribir la siguiente ecuación(1.3-5).

$$\tau(\lambda) + \rho(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \quad (1.3-5)$$

En el caso de cuerpo negro tenemos que  $\alpha=1$ , es decir  $\tau=\rho=0$ . En el caso de un cuerpo negro en equilibrio térmico la absortancia y la emisividad deben ser iguales

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (1.3-6)$$

En el caso de cuerpos opacos en el infrarrojo, es decir  $\tau(\lambda)=0$ , obtenemos.

$$\rho(\lambda) + \varepsilon(\lambda) = 1 \quad (1.3-7)$$

Y para el caso de cuerpos que no reflejen como puede ser un gas

$$\tau(\lambda) + \varepsilon(\lambda) = 1 \quad (1.3-8)$$

#### 1.4. Gases, selección espectral

Los gases presentan un espectro formado por líneas discretas. Esto es debido a la radiación en esas zonas produce transiciones entre los niveles energéticos vibrarrotacionales, debido a los cambios en el momento dipolar de la molécula, Por ello los gases homonucleares, los cuales no presentan momentos dipolares, no son detectables en IR (1).

Este fenómeno tiene una (particularidad) y es que cada gas absorbe en una longitudes de onda características, a esto se llama firma espectral de un gas, Figura 1.4-1 .

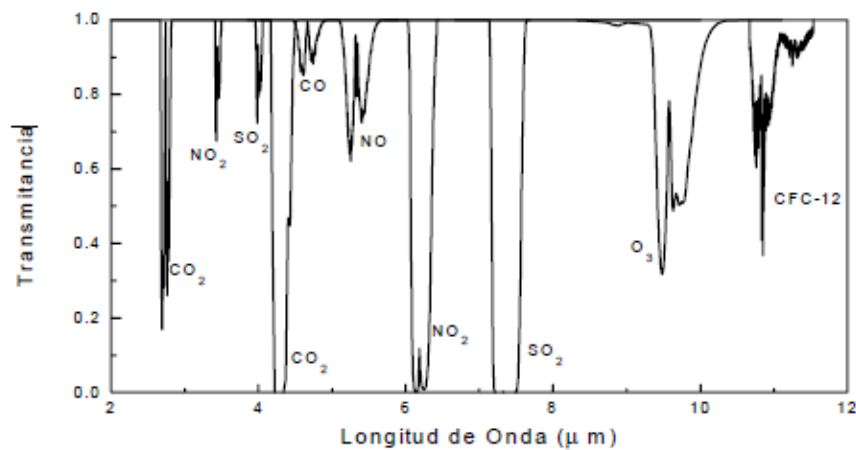


Figura 1.4-1 Bandas de absorción de algunos gases de interés en el espectro infrarrojo. (6)

## 2. Componentes de un sistema de imagen infrarroja

---

En este capítulo se desarrollan, brevemente, los diferentes subsistemas que componen una cámara infrarroja y cuáles son los factores más determinantes a tener en cuenta en el proceso de selección de componentes para el desarrollo de un dispositivo.

### 2.1. Óptica

El sistema óptico es el primero de nuestro sistema que entrara en contacto con la radiación incidente. Por lo que es el encargado de recoger toda la radiación IR y concentrarla en nuestro detector. Conceptualmente una lente infrarroja y una lente de cualquier cámara de fotos convencional son iguales. Existen pequeñas particularidades que diferencian a ambas: principalmente los materiales empleados en un caso y en otro, mientras que en fotografía las lentes se fabrican con vidrio o plástico, en infrarrojo se emplean otros como el germanio, silicio, seleniuro de zinc, zafiro, etc.

Los parámetros fundamentales que definen estos sistemas son:

- *Distancia focal, [f]*: es la distancia desde el centro de la lente al lugar donde convergen los rayos que entran paralelos, dicho punto es llamado foco.
- *Pupila de entrada [D<sub>pe</sub>]*: Se define por su diámetro y limita el haz de rayos que partiendo de un objeto atraviesan la lente.
- *Numero f [F#]*: Es una relación de las dos magnitudes anteriores.

$$F\# = \frac{f}{D_{pe}} \quad (2.1-1)$$

- *Campo de visión instantáneo o IFOV (Instantaneous Field Of View)*: Es el ángulo de visión de cada pixel. Para el caso de elementos cuadrados se puede expresar en radianes de la siguiente forma:

$$IFOV = \frac{\text{Longitud detector}}{f} \quad (2.1-2)$$

- *Campo de visión o FOV (Field Of View): Correspondería al campo de visión de un array de detectores:*

$$FOV = IFOV \cdot n \quad (2.1-3)$$

*Siendo n el número de píxeles en una de las dimensiones del array.*

### 2.1.1. Filtros

Otro de los elementos ópticos que son de gran utilidad para ciertas aplicaciones son los filtros interferenciales. Mediante estos filtros se selecciona la banda de operación del instrumento.

La selección espectral consiste en ver un determinado rango del espectro despreciando el resto. Ya sea para evitar o realzar el contraste de fenómenos espectralmente selectivos, como puede ser una llama. Otra posible utilidad es reducir la cantidad de energía que llega al detector.

## 2.2. Detectores infrarrojos

Los detectores son los encargados de transformar la radiación incidente en magnitudes electrónicas para poder ser procesadas e interpretadas. El tipo de detector condicionará la respuesta del sistema. A la hora de elegir el detector más adecuado hay que tener en cuenta diferentes cuestiones, como el ancho de banda, la sensibilidad o el precio, entre otros.

Para poder elegir de forma correcta hay que evaluar una serie de figuras de mérito que definen las prestaciones de los mismos.

### *Responsividad*

Habitualmente se define como el cociente entre la señal de salida eléctrica frente a la potencia asociada a la radiación incidente a la que es sometido. Para detectores infrarrojos su expresión resulta.



$$R = \frac{\text{Señal de salida}}{\text{radiación IR}} \quad [V/W] \quad (2.2-1)$$

La respuesta de los detectores infrarrojos es lineal con la radiación incidente en el mismo. Siempre y cuando el detector se encuentre dentro del rango de trabajo.

### ***Ruido***

El ruido hace referencia a las señales eléctricas de distinta procedencia de la que estamos interesados en medir. Con esto se engloba tanto a aquellas fuentes que podrían ser controlables (interferencias eléctricas, variaciones térmicas) como aquellas inherentes al sistema.

### ***Relación señal ruido o SNR (Signal to Noise Ratio)***

Es la relación entre la señal eléctrica que estamos interesados en medir y el resto de señales, las cuales hemos definido como ruido.

$$SNR = \frac{\text{Señal}}{\text{Ruido}} \quad (2.2-2)$$

### ***Diferencia de temperatura de ruido equivalente o NETD (Noise Equivalent Temperature Different)***

Es la diferencia de temperatura de un objeto que produce una variación de señal equivalente al ruido del sistema.

### ***Rango dinámico***

Es la relación entre las señales de mayor y menor energía que pueden ser medidas de forma simultánea, con una configuración determinada.

## 3. Procedimiento general para la medida cuantitativa en infrarrojo

---

### 3.1. Introducción a la termografía infrarroja

Dentro de las posibles aplicaciones de la tecnología de infrarrojo una de las más extendidas es la termografía. Dentro de la termografía debemos diferenciar entre, la cualitativa en la cual el usuario busca una mayor nitidez de la imagen y mayor interés es la observación de contrastes radiométricos entre las distintas partes de la imagen, y los sistemas de termografía cuantitativa que mediante un calibrado se obtiene una imagen de radiancia y/o temperatura.

La termografía infrarroja como tecnología presenta una serie de ventajas frente a otros sistemas de medida de la temperatura como pueden ser los termopares o los sensores embebidos, etc:

- Medida a distancia, no necesita estar en contacto con el objeto a medir. Esto permite hacer las medidas sin perturbar el objeto de medida, esta característica, también, lo hace muy útil para medir objetos frágiles de difícil acceso, en entornos hostiles o en movimiento.
- Medida simultánea, de todos los puntos de la imagen en lugar de sistemas puntuales.
- Tiempo de respuesta rápido, pues no necesita estabilización térmica.

Por otro lado presentan un hándicap que es la necesidad de conocer la emisividad de la superficie del objeto que estamos midiendo, y tener un conocimiento más preciso del medio en el que vamos a trabajar.

Para poder comprender mejor el problema se debe introducir una serie de conceptos básicos:

- Radiancia aparente o radiancia que llega al detector: es la radiancia emitida por el blanco tras ser atenuada por el camino óptico.
- Temperatura brillo: temperatura que se obtiene partiendo de la radiancia emitida considerando que el objeto es un cuerpo negro.

- Temperatura real: es la temperatura considerando que la emisividad del objeto a medir es distinta de uno.

Los sistemas termografía infrarrojos se calibran en radiancia aparente, por medio de una matriz de Ganancia y offset. Es mediante el procesamiento de datos donde se corrige la atenuación producida por el camino óptico y se obtiene la radiancia emitida por el objeto. Y en este momento se puede obtener la temperatura de brillo de un objeto y en el caso de que alimentemos al sistema con la emisividad del objeto a medir se podrá obtener la temperatura real de objeto a medir

### 3.2. Modelo de transferencia radiativa

El primer paso para poder realizar una medida cuantitativa es disponer de un sistema correctamente calibrado. Aunque disponer de un sistema calibrado es importante, si queremos realizar medidas con precisión, no es el único factor que debemos tener en cuenta. La influencia del entorno (medio de propagación, reflejos, background) puede ser un factor determinante sino se cuantifica apropiadamente. En la Figura 3.2-1 podemos ver el esquema de un caso de observación directa de un objeto opaco mediante una cámara IR.

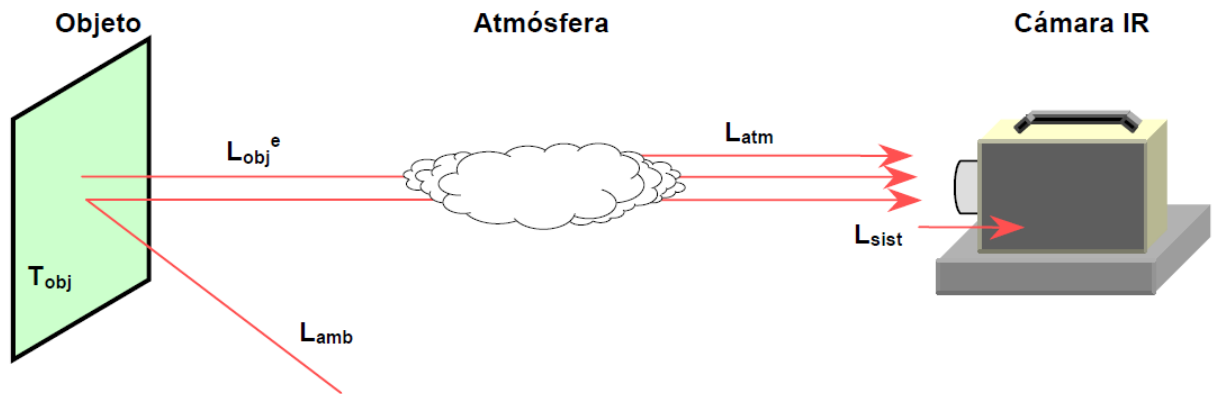


Figura 3.2-1 Esquema radiativo de una medida de teledetección (1)

Una vez tenemos nuestro escenario completamente definido podemos plantear el modelo de transferencia radiativa que lo define. Por otro lado sabemos que la respuesta de los detectores es lineal con la radiancia y no con la temperatura.

$$L_D = (L_{obj}^{CN} \cdot \epsilon_{obj} + L_{ext} (1 - \epsilon_{obj})) \cdot (\tau_{atm} \cdot \tau_{optica} \cdot \tau_{filtro}) + (1 - \tau_{optica}) \cdot L_{optica}^{CN} + (1 - \tau_{filtro}) \cdot L_{filtro}^{CN} + L_{atm} \cdot (\tau_{optica} \cdot \tau_{filtro}) \quad (3.2-1)$$

Dónde:

- $L_D$  es la radiancia que llega al detector, radiancia aparente.
- $L_{obj}^{CN}$  es la radiancia de cuerpo negro a la temperatura del objeto.
- $\epsilon_{obj}$  es la emisividad del objeto.
- $L_{ext}$  Es la radiación que llega al objeto proveniente de fuentes externas, ya sea la propia temperatura ambiente u otro tipo de fuentes radiativas.
- $\tau_{atm}$  Transmitancia de la atmosfera.
- $\tau_{optica}$  Transmitancia de la óptica del sistema.
- $\tau_{filtro}$  Transmitancia del filtro IR en el caso de que hubiera.
- $L_{optica}^{CN}$  es la radiancia de cuerpo negro a la temperatura de la óptica.
- $L_{filtro}^{CN}$  es la radiancia de cuerpo negro a la temperatura del filtro.
- $L_{atm}$  radiancia de la atmosfera.

Como podemos observar incluso en un caso sencillo hay números factores ajenos al equipo y al blanco que pueden afectar a las medidas.

La radiación que emite un cuerpo gris depende de la temperatura, siguiendo la ley de Planck, multiplicado por su emisividad. Por lo que para poder resolver el modelo directo es necesario conocer la radiación que llega a la cámara. Aparte de las variables propias de nuestro sistema debemos conocer el medio de propagación, la radiación del ambiente, la temperatura del objeto a medir y su emisividad.

Pese a las simplificaciones realizadas, el modelo presenta cierta dificultad y para poder obtener la información sobre la temperatura de los objetos necesitamos complementar el modelo:

- Modelo de sistema:
  - Calibración del sensor, que nos permita encontrar una correlación entre los niveles digitales y la radiación recibida.
  - Transmitancia de la óptica y el filtro.
- Modelo del escenario:
  - Modelo del ambiente, estimar las posibles contribuciones de radiaciones externas y así como las contribuciones de la atmósfera.
  - Modelo atmosférico, pérdida de señal debida a la transmitancia atmosférica.

- Modelo del objeto, conocer la emisividad.

### 3.2.1. Medio de propagación. La atmósfera

La atmósfera entendida como el medio por el que se transmite la radiación infrarroja puede llegar a ser un gran problema a la hora de realizar medidas cuantitativas. Sobre todo en casos donde el camino óptico sea grande. En distancias cortas la atenuación de la señal que provoca puede llegar a ser despreciable, en especial si nos encontramos dentro de alguna de las ventanas del infrarrojo. La forma más correcta de actuar es medir la transmitancia atmosférica o en su defecto utilizar un modelo atmosférico, que nos permita cuantificar el valor de la transmitancia atmosférica. Uno de los modelos atmosféricos más utilizado es MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission).

MODTRAN, es un modelo atmosférico desarrollado y validado por la Fuerza Aérea Americana que permite obtener la transmitancia atmosférica espectral en función de parámetros atmosféricos.

Los datos importantes a tener en cuenta a la hora de estudiar la atmósfera es que ésta produce una atenuación de la señal con la distancia y su comportamiento no es igual en todas las longitudes de onda.

La atenuación a la que es sometido un haz de radiación al atravesar la atmósfera se denomina proceso de extinción. Por lo que la transmitancia atmosférica para un recorrido  $x$ , viene dado por:

$$\tau = EXP(-\sigma(\lambda) \cdot x) \quad (3.2-2)$$

Dónde  $\sigma$  es el coeficiente de extinción.

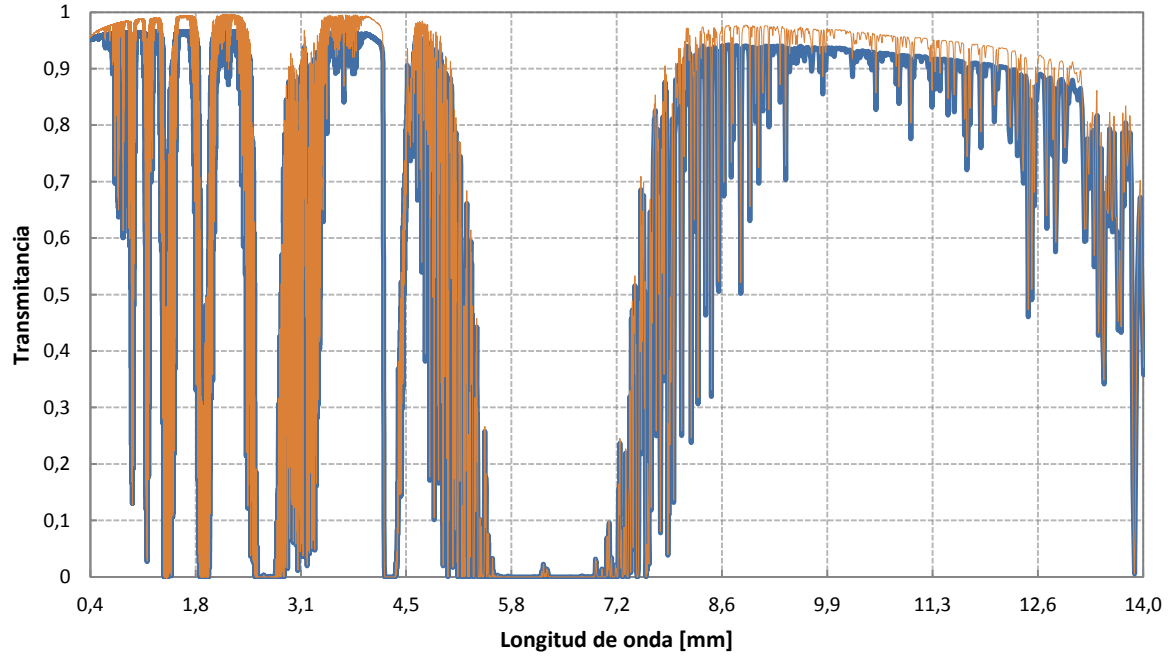


Figura 3.2-2 Transmitancia atmosférica para dos condiciones ambientales distintas y un camino óptico de 200m obtenido mediante MODTRAN

### 3.3. Calibración del sistema y medida de la temperatura

Como ya hemos comentado con anterioridad la respuesta de un detector infrarrojo es lineal con la radiancia recibida. Por lo tanto el primer paso es buscar un sistema radiométrico conocido que nos permita conocer la radiancia que llega a nuestro sistema, y de esta forma poder calcular la relación nivel digital radiancia que presenta el detector.

En el caso de que las medidas se hicieran a una distancia corta, dentro de una de las ventanas del infrarrojo y teniendo en cuenta que vamos a calibrar frente a un cuerpo con una emisividad alta, si la calibración la realizamos para un rango de temperaturas alta, podríamos despreciar la influencia del ambiente simplificando la ecuación (3.2-1).

$$L_D = L_{obj}^{CN} \cdot \epsilon_{obj} \cdot (\tau_{optica} \cdot \tau_{filtro}) + (1 - \tau_{optica}) \tau_{filtro} \cdot L_{optica}^{CN} + (1 - \tau_{filtro}) \cdot L_{filtro}^{CN} \quad (3.3-1)$$

En la ecuación (3.3-1) aún nos quedan como factores que pueden distorsionar la calibración, la radiancia emitida por el filtro y la óptica por tener una cierta

temperatura. En algunas situaciones concretas este efecto se puede despreciar pero no así en el caso general.

### **3.3.1.Descripción del procedimiento**

Para poder realizar una calibración necesitamos un patrón de medida. En las calibraciones de sistemas infrarrojos se utiliza como patrón lo que es conocido como cuerpo negro, no debemos confundirlo con los cuerpos negros vistos en el apartado 1.3 de este proyecto, pues estos cuerpos negros son en realidad cuerpos grises de alta emisividad. Los cuerpos negros vienen con un sistema de control que nos permite configurar la temperatura en la superficie del mismo con su correspondiente hoja de certificación en la que se especifica su error. Por lo tanto conocemos todos los datos necesarios para poder calcular la radiancia del cuerpo negro.

Pasos:

- Configuramos la cámara para el rango de temperaturas deseado y que se usará para medir.
- Situamos la cámara infrarroja a la mínima distancia de enfoque, para evitar influencias atmosféricas.
- Adquirimos secuencias de imágenes para distintas temperaturas del cuerpo negro.
- Obtenemos curva de calibración Niveles digitales frente a radiancia.

Un detector no ve la radiación de forma espectral sino que integra toda la energía que le llega dentro de su rango de detección. Por lo tanto la ecuación que debemos utilizar la integral de la radiancia (3.3-2).

$$L_D = \int_{\lambda_{inicio}}^{\lambda_{fin}} L_{obj}^{CN}(\lambda, T_{Obj}) \cdot \epsilon_{obj}(\lambda) \cdot (\tau_{optica}(\lambda) \cdot \tau_{filtro}(\lambda)) + (1 - \tau_{optica}(\lambda) \tau_{filtro}) \cdot L_{optica}^{CN}(\lambda, T_{optica}) + (1 - \tau_{filtro}(\lambda)) \cdot L_{filtro}^{CN}(\lambda, T_{filtro}) \cdot d\lambda \quad (3.3-2)$$

Donde  $\lambda$  inicio y fin indican el rango de detección del detector

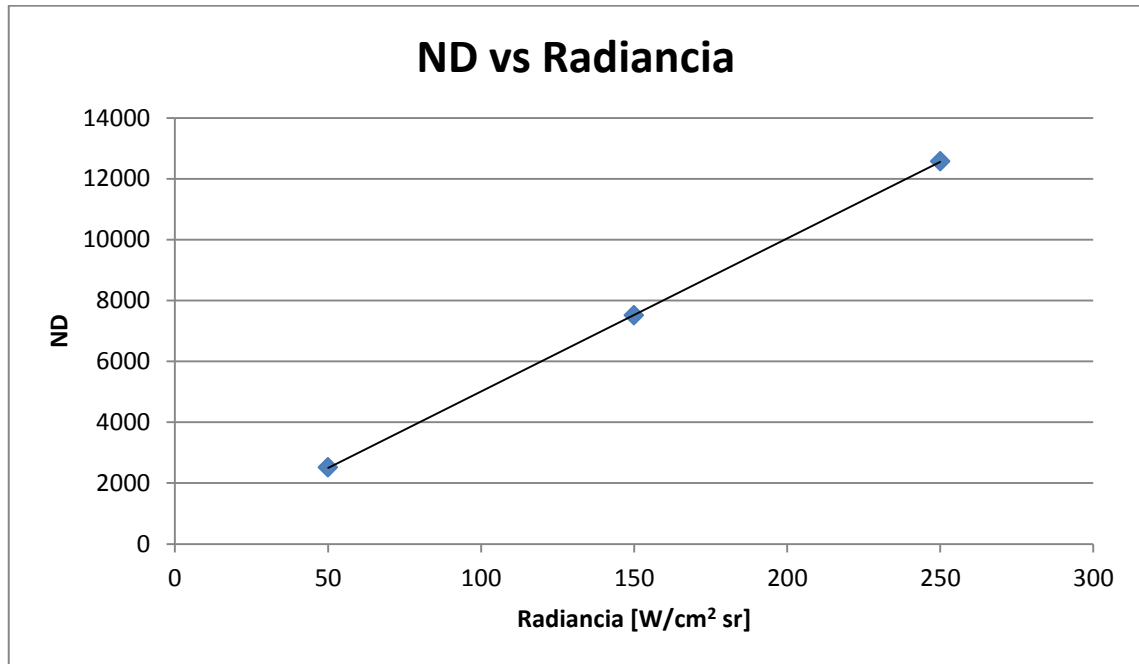


Figura 3.3-1 Gráfica ilustrativa de una calibración ND vs radiancia

Ahora nos encontramos en condiciones de estudiar la respuesta de nuestro detector en función de radiancia. En la Figura 3.3-1 podemos ver cómo nos quedaría si representamos, en una gráfica, los valores de niveles digitales que nos daría un detector al enfocar cuerpo negro a una cierta temperatura, frente a la radiancia que obtendríamos para esa temperatura de cuerpo negro de la ecuación (3.3-2).

Como podemos observar se cumple una relación directa entre radiancia aparente y niveles digitales. Por lo tanto con una simple relación (3.3-2), podemos calibrar nuestro sistema en radiancia aparente.

$$ND = Ganacia \times Radiancia + offset \quad (3.3-3)$$

Con un sistema calibrado podemos saber la radiancia que llega a nuestro sistema y por tanto ahora estamos en disposición de recuperar la temperatura de un objeto, si conocemos su emisividad, solo debemos volver a resolver la ecuación (3.3-2) para las



nuevas condiciones planteadas y buscar la temperatura del objeto que nos da como solución la radiancia aparente que estamos midiendo con nuestra cámara.

### **3.3.2. Corrección de no uniformidad**

A la salida de una cámara infrarroja las imágenes no están uniformizadas, la señal de los detectores no es uniforme ante una misma fuente radiante. Esta falta de uniformización tiene dos componentes. Por un lado, la respuesta de todos los píxeles no tiene por qué ser exactamente la misma y por tanto para una misma radiancia en el detector dan valores de niveles digitales distintos. Y por otro, las ópticas pueden producir un ensombrecimiento en determinadas partes de la imagen, este efecto es conocido como viñeteo. Esto se soluciona haciendo una corrección de no uniformidad (NUC, Non Uniformity Correction) (7), existe dos tipos de corrección de no uniformidad de a un punto y a dos puntos. Esta última es la que se ha aplicado en nuestro sistema

La corrección de la no uniformidad de la imagen es la que permite asegurar que ante una misma señal de los detectores, estos, están recibiendo la misma radiación incidente.

#### ***Procedimiento para realizar una corrección de no uniformidad a 2 puntos***

El procedimiento consiste en generar un ajuste que nos permita corregir la respuesta de los detectores para forzar a los detectores a dar la misma respuesta en ND ante una misma radiación (8).

Para realizar esta corrección necesitamos dos imágenes que tengamos la certeza de que la radiación a la entrada del sistema es la misma y uniforme y que esta sea distinta en cada una de las imágenes. El método más sencillo para tener estas imágenes es acercar a nuestro detector un cuerpo negro a dos temperaturas distintas, de forma que la superficie del cuerpo negro cubra toda la imagen y que ambas temperaturas se encuentren dentro de la zona lineal de nuestro detector.

Sabemos que la respuesta de los detectores es lineal con la radiancia y por tanto se puede ajustar a una recta. Esta respuesta no es exactamente igual en todos los detectores y, el objetivo de esta corrección es la de corregir estas pequeñas desviaciones de forma que la respuesta sea la misma en todos. Hay que tener en

cuenta que la ganancia y el offset que utilizamos en (3.3-4) no es el mismo que el utilizado para la calibración del sistema.

Como resultado final de la corrección obtenemos una matriz de ganancia y offset para nuestro detector.

$$ND_{ij} = \text{Ganancia}_{NUC_{ij}} \cdot ND_{w_{ij}} + \text{offset}_{NUC_{ij}} \quad (3.3-4)$$

$$\text{Ganancia}_{NUC_{ij}} = \frac{\overline{ND}(T1) - \overline{ND}(T2)}{ND_{w_{ij}}(T1) - ND_{w_{ij}}(T2)} \quad (3.3-5)$$

$$\text{Offset}_{NUC_{ij}} = \text{Media}ND(T1) - \text{Ganancia}_{ij} \times ND_{w_{ij}}(T1) \quad (3.3-6)$$

Dónde:

- $ND_{ij}$  es la imagen en niveles digitales tras corregir la no uniformización
- $ND_{w_{ij}}$  imagen en niveles digitales según sale del detector
- $\text{Ganancia}_{NUC_{ij}}$  matriz de ganancias, cada pixel tiene un valor diferente
- $\text{offset}_{NUC_{ij}}$  matriz de offset, cada pixel tiene un valor diferente
- $\overline{ND}(T1)$  Nivel digital promedio de la matriz de pixeles  $ND_{w_{ij}}(T1)$
- $ND_{w_{ij}}(T1)$  Matriz de niveles digitales antes de corregir para una temperatura de cuerpo negro T1
- $\overline{ND}(T2)$  Nivel digital promedio de la matriz de pixeles  $ND_{w_{ij}}(T2)$
- $ND_{w_{ij}}(T2)$  Matriz de niveles digitales antes de corregir para una temperatura de cuerpo negro T2

Como ejemplo demostrativo de la capacidad de corrección de la imagen de este proceso a continuación en la Figura 3.3-2 podemos ver la misma imagen infrarroja, antes y después de haber sido corregida, mediante el método descrito.

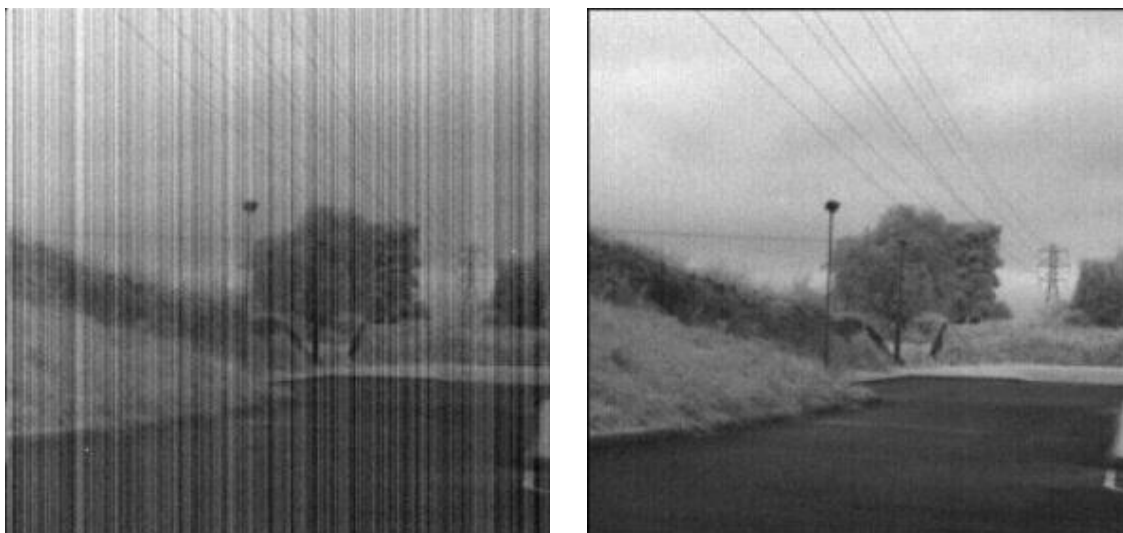


Figura 3.3-2 A la derecha imagen infrarroja raw. A la izquierda la misma imagen después de haber sido corregida mediante una NUC a dos puntos.

## 4. Plataforma de desarrollo software

---

### 4.1. LabVIEW

LabView (Laboratoy Virtual Instrument Engineering Workbench). Es un entorno de programación gráfica para la creación de aplicaciones de una forma rápida y sencilla desarrollado por National Instruments (9).

La idea original de LabView era facilitar la tarea de programación en la automatización de control de procesos industriales. El hecho de que la programación se pudiera realizar de una forma gráfica en lugar de en un lenguaje de programación más tradicional facilitó el camino para que personas menos habituadas a la programación pudiesen hacer programas de cierta complejidad.

En la actualidad Labview cuenta con una gran cantidad de librerías de todos los ámbitos y con infinidad de aplicaciones. Lo que lo convierte en un lenguaje ideal para la realización de todo tipo de programas. National Instrument, por otro lado, ha desarrollado un gran abanico de hardware desde todo tipo de cámaras hasta simples caudalímetros. Todo el hardware desarrollado por National Instrument viene con un software en Labview así como las librerías necesarias para poder utilizar todo el potencial de sus instrumentos en nuestros propios desarrollos de software.

La expansión de Labview es tal que incluso desarrolladores de hardware ajenos a National Instruments facilitan las librerías de sus productos tanto en C como en Labview.

### 4.2. Entorno de desarrollo

La programación en Labview se basa en lo que definen como instrumentos virtuales (Virtual Instruments, VI). Los VIs se pueden asociar con lo que es conocido en otros lenguajes de programación como rutinas o funciones en los lenguajes secuenciales (10).

### 4.2.1. Instrumentos virtuales

Los VIs constan de tres partes: Panel frontal, diagrama de bloques y un icono gráfico que lo representara dentro del entorno gráfico.

Un programa en Labview constara de un VI principal, con el cual interaccionara el usuario y dentro de este, en el diagrama de bloques, se encuentran los diferentes SubVIs Figura 4.2-1.

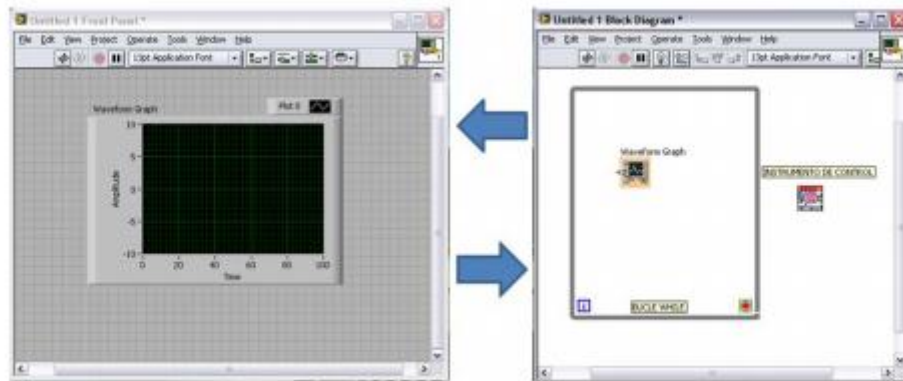


Figura 4.2-1 Panel frontal y diagrama de bloque de un VI en Labview

### 4.2.2. Panel frontal:

Es lo primero que se ve al abrir un VI. Se encarga de la interacción gráfica con el usuario y de la visualización. Gestiona la entrada y salida de información al diagrama de bloques. Esta característica hace que un mismo VI pueda ser usado como VI principal o como SubVI para otra aplicación.

Mediante el panel frontal podemos hacer interfaces de usuario complejas, para ello, el programa, cuenta con una variada paleta de controles Figura 4.2-3. Todos los controles son personalizables en el concepto amplio de la palabra, se pueden modificar las formas, los tamaños, los colores e incluso incluir imágenes propias para hacer una interfaz más personalizada. Otra opción que se nos permite es la de asignar combinaciones de teclas a controles.

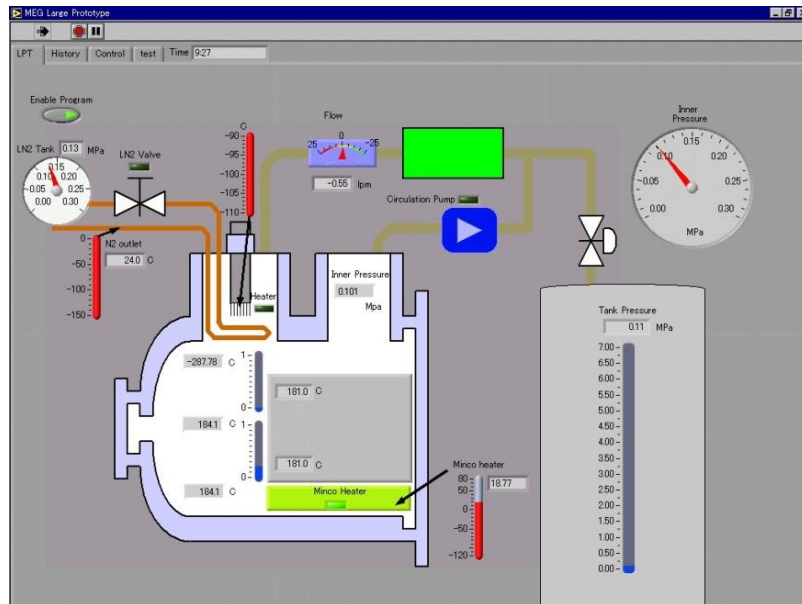


Figura 4.2-Ejemplo de interfaz gráfica en LABVIEW

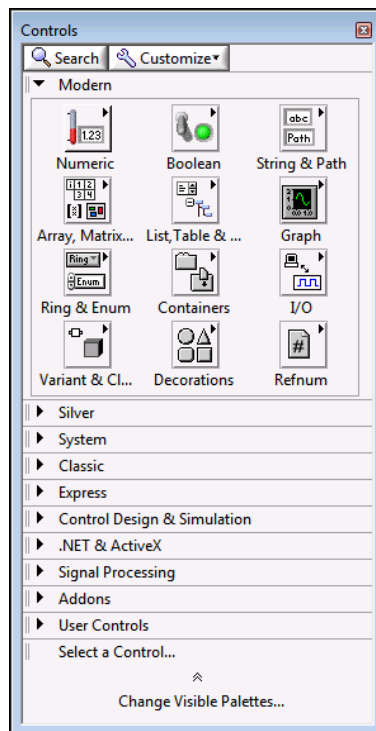


Figura 4.2-3 Paleta de controles del panel frontal de Labview

## Diagrama de bloques

El diagrama de bloques es donde se realizan todas las tareas del VI que a su vez se basa en otros VIs. El funcionamiento es aparentemente sencillo, se basa en unir

diferentes entradas y salidas de los SubVIs con hilos que a su vez se pueden comunicar con el panel frontal mediante su representación en el diagrama de bloque.

Dentro del diagrama de bloque se pueden utilizar todos los recursos de una programación habitual como son bucles, puntos de parada, condicionales, ejecución secuencial. Labview tiene una gran variedad de librerías, como pueden ser: tratamiento de imagen, gestión de informes o una gran variedad de protocolos de comunicación.

Otra de las ventajas que tiene es que el propio Labview gestiona la secuencia optima que deben tener los procesos para optimizar la utilización de los procesadores y de esta forma hacer el programa más eficiente. Pero si el usuario decide gestionar la prioridad de los procesos el propio programa facilita su gestión de una forma sencilla.

Podemos observar un ejemplo de diagrama de bloques en la Figura 4.2-4

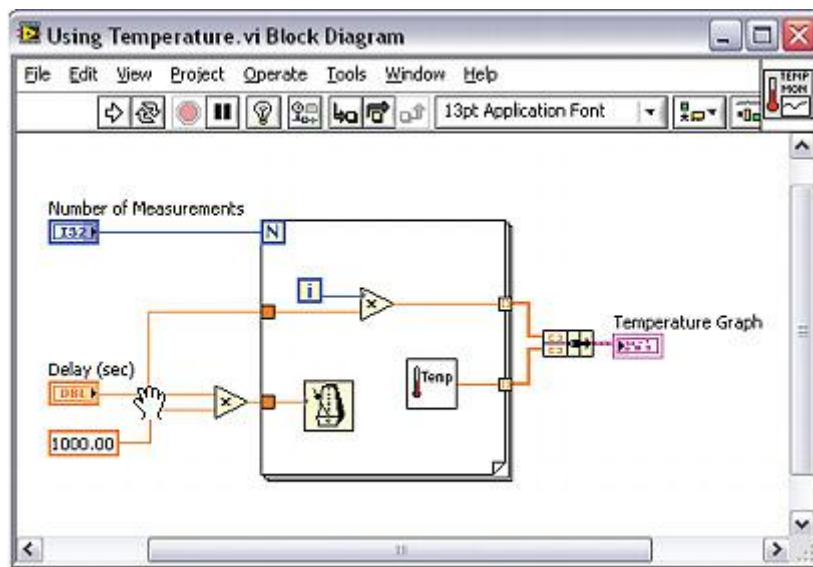


Figura 4.2-4 Ejemplo de diagrama de bloques de Labview (9)

## Icono

Es el icono con el que se visualizara el VI cuando estemos dentro de otros VIs. Dentro de estos iconos también debemos definir las entradas y salidas del VI, lo que nos permitirá utilizarlo como SubVI.



Figura 4.2-5 Icono de un VI y estructura de conectores de un VI



## 5. Ingeniería de Sistemas e Integración. Aplicación a medida de temperatura y visualización de gases

---

### 5.1. Desarrollo hardware

Uno de los primeros pasos a resolver a la hora de realizar la integración de componentes de una cámara infrarroja, es una correcta selección de componentes y en especial el detector infrarrojo que juega un papel destacado. El detector es el que fija la ventana espectral en la cual podremos trabajar, pero también es el que limita en cierta medida la resolución de la imagen.

Los detectores son el componente base de toda cámara infrarroja y entorno al cual gira el resto de desarrollos. Para este proyecto fin de carrera hemos seleccionado un detector con un rango de detección de 7 a 14  $\mu\text{m}$  que nos aporta unas cualidades óptimas para realizar termografía, además en esta región del espectro infrarrojo podemos encontrar algunos gases de interés para la detección de fugas.

En cualquier caso, el software desarrollado es adaptable a otras cámaras con otra tecnología.

#### 5.1.1. Detector:

SCD bird 384 uncooled 25 $\mu\text{m}$  (11) (Figura 5.1-1). Anexo II: Detector Infrarrojo

<b>Detector</b>	Microbolómetros
<b>Tamaño array</b>	384x288
<b>Banda espectral</b>	7-14 banda extendida en el LWIR
<b>Pixel Pitch</b>	25 $\mu\text{m}$
<b>Frame rate</b>	60HZ
<b>NETD@300K</b>	<50mK
<b>Temperatura de trabajo</b>	-40 a 70C
<b>Salida imagen</b>	CameraLink
<b>Control</b>	RS-232
<b>Alimentación</b>	5V

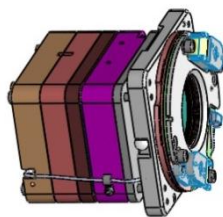


Figura 5.1-1 Esquema del detector SCD bird 384

Este tipo de detectores son mucho más económicos que los de 3 a 5  $\mu\text{m}$  al ser detectores no refrigerados, por el mismo motivo tienen un menor consumo, y son más adecuados para trabajar largos periodos de forma continuada.

### 5.1.2.Sistema óptico:

El sistema óptico es el elemento que más versatilidad nos puede aportar a una cámara infrarroja. El hecho de tener un dispositivo al que le podamos acoplar numerosos sistemas ópticos es un punto a favor de la optimización del hardware.

En este sentido hemos desarrollado una pieza de acoplamiento óptico que permita trabajar con varias ópticas. Para las aplicaciones que vamos a tratar en este proyecto fin de carrera solo vamos a mencionar dos, una para largas distancias y otra para distancias más cortas.

En las longitudes de onda del detector seleccionado la óptica de mayor longitud focal de la que dispone el laboratorio es una de 210mm. Esta óptica tiene otra cualidad añadida y es que dispone de un sistema de enfoque motorizado. (12)Anexo III: Óptica 210mm

<b>Óptica</b>	Ophir
<b>Longitud focal</b>	210mm
<b>Numero f</b>	1.4
<b>Recubrimiento</b>	DLC (diamond like carbón)
<b>Otros</b>	Motorizada

Como podemos ver en la Figura 5.1-2 El control de la óptica se debe realizar a 12 V en contra de los 5 V de alimentación del detector y cuenta con un circuito de protección para detenerse al final del recorrido.

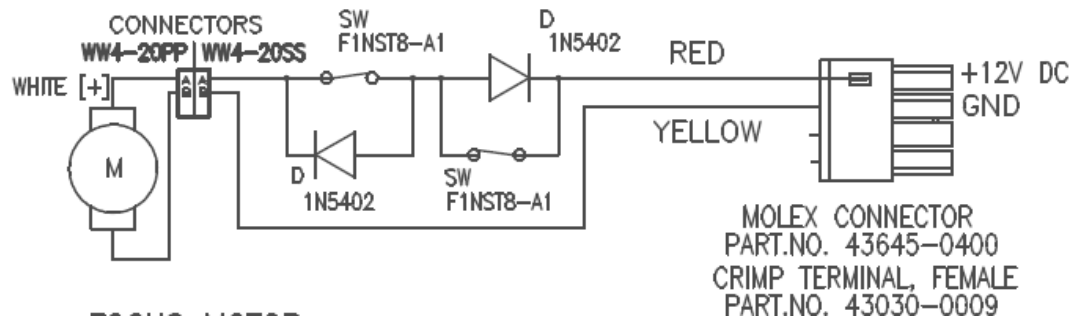


Figura 5.1-2 Circuito del motor de la óptica Ophir

La otra óptica seleccionada, es un modelo desarrollado por el laboratorio y cuenta con una particularidad y es que permite el paso tanto de la radiación en las dos ventanas de infrarrojo de mayor interés: de 3 a 5  $\mu\text{m}$  y de 8 a 12  $\mu\text{m}$ . Anexo IV: Óptica 35mm.

<b>Óptica</b>	Diseño propio. Lentes ISP Optics
<b>Longitud focal</b>	35mm
<b>Numero f</b>	1.2
<b>Recubrimiento</b>	AR (anti-reflection)

### *Filtro paso banda*

Los filtros paso banda es el elemento que permite seleccionar una banda estrecha bien definida. La selección de la banda vendrá determinada por la aplicación.

Para nuestra aplicación de medida de temperatura, el utilizar un filtro interferencial tiene un objetivo doble. El primero es que el detector seleccionado saturaría al intentar medir temperaturas tan altas en toda la banda del sensor, esto nos obliga a reducir la cantidad de energía que llega al sensor. Por otro lado reduciendo la banda del detector intentamos quitarnos error de medida por incertidumbre en la transmitancia atmosférica, evitando las zonas más complicadas que son por debajo de 8  $\mu\text{m}$  y por encima de 12  $\mu\text{m}$ . La transmitancia del filtro seleccionado se representa en la Figura 5.1-3.

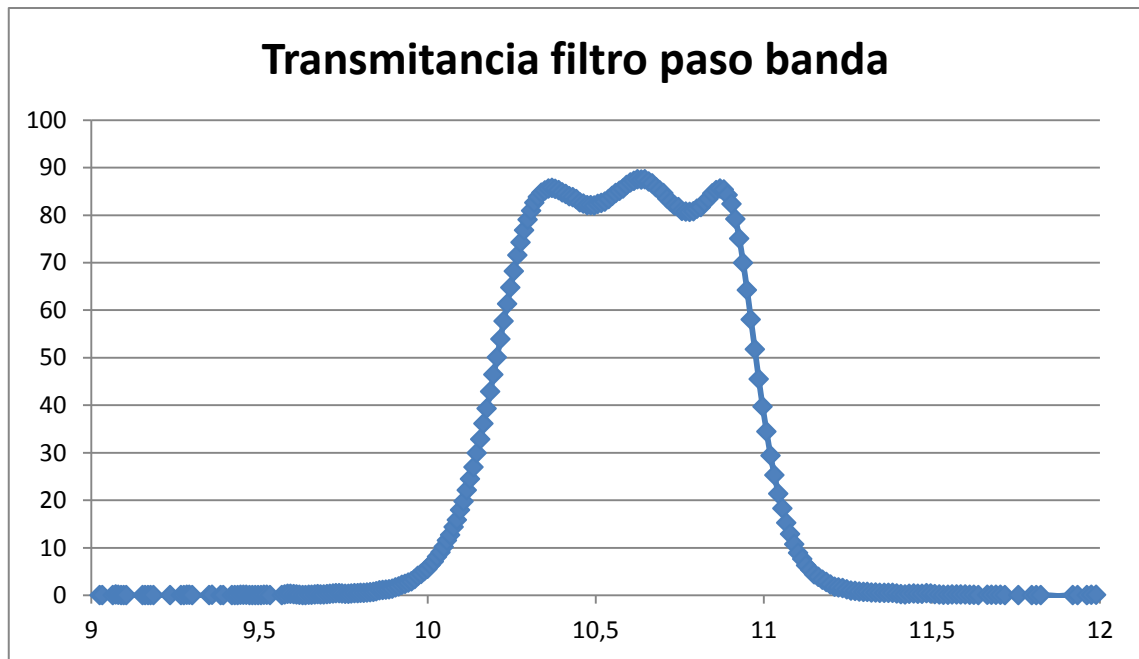


Figura 5.1-3 Transmitancia del filtro paso banda seleccionado para la aplicación de termografía

En el caso de visualización de gases la finalidad del filtro es la de sintonizar la banda de trabajo del dispositivo a los picos de absorción del gas (Figura 5.1-4) para optimizar la relación entre la señal del gas y la del fondo.

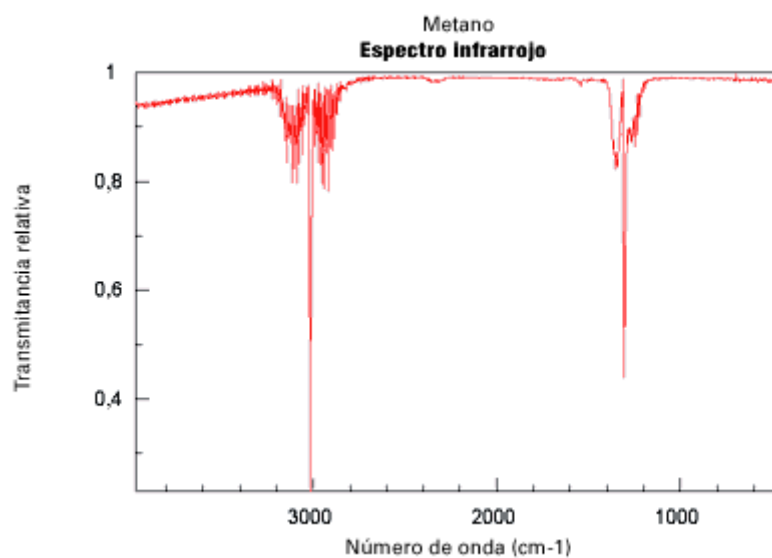


Figura 5.1-4 Ejemplo de espectro de transmitancia de un gas, en este caso corresponde al metano

### 5.1.3.Fuente de iluminación IR

En aquellos casos en los que la señal del gas con respecto al fondo, no genere un contraste radiométrico suficiente como para que pueda ser detectado por el sensor de forma pasiva, es necesario iluminar el escenario con una fuente de radiación.

Como fuente radiante se ha seleccionado un Panel radiante Raymax 1120, 6" (152mm) X 10" (254mm), 600 W.

### 5.1.4.Esquema de montaje hardware de la cámara infrarroja

En nuestro caso el detector de infrarrojo no estaba montado dentro de una cámara, por otro lado teníamos que realizar el acople con las dos ópticas y el control del motor de enfoque de la óptica de 210mm. Esto nos obliga a fabricar una carcasa y diseñar las distintas conexiones entre la cámara y el ordenador. En la Figura 5.1-1 podemos ver el esquema de montaje de la cámara infrarroja.

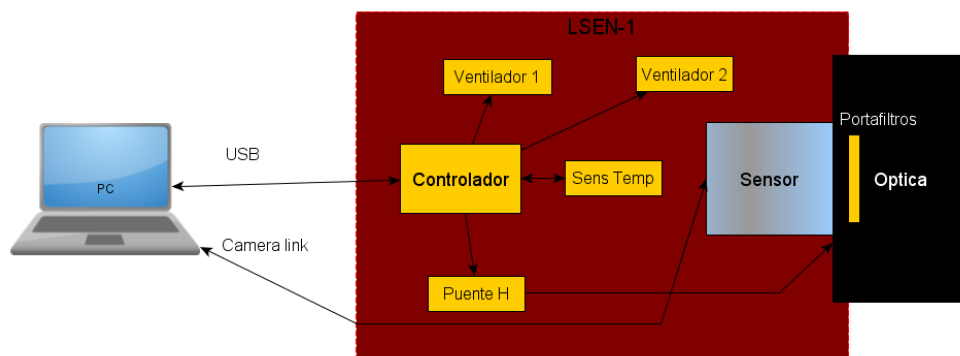


Figura 5.1-5Esquema de montaje de la cámara infrarroja

### 5.1.5.Sistema de control de foco motorizado

Consta de tres partes:

1. Control mediante un módulo NI
  - a. Conectado al ordenador mediante USB nos permite gestionar el puente H que a su vez hace que se mueva el motor de la óptica Figura 5.1-6.



Figura 5.1-6 Modulo de National Instruments utilizado para el control del sistema óptico de 210 mm (13)

## 2. Convertidor de 5 v a 12 v

- a. La alimentación de la cámara se realiza a 5 v y los motores de la óptica funcionan a 12 v eso hace necesario introducir un convertidor de 5 a 12 V Figura 5.1-7



Figura 5.1-7 Convertidos regulable 5 a 12V

## 3. Puente H

- a. El puente H Figura 5.1-9 es un circuito que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos con un funcionamiento?. El funcionamiento del mismo es muy simple como podemos ver en Figura 5.1-8

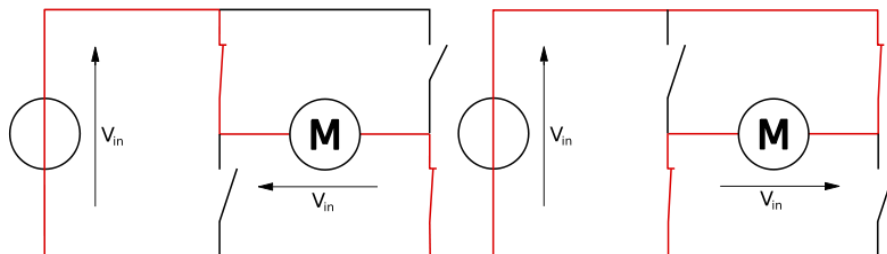


Figura 5.1-8 Esquema de funcionamiento de un puente H

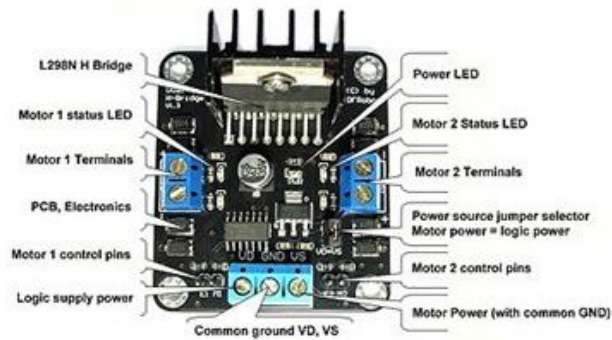


Figura 5.1-9 Puente H seleccionado

Todo los componentes se montaron dentro de la carcasa en la Figura 5.1-10 podemos ver todos los componentes en el proceso de montaje con la óptica de 210mm.

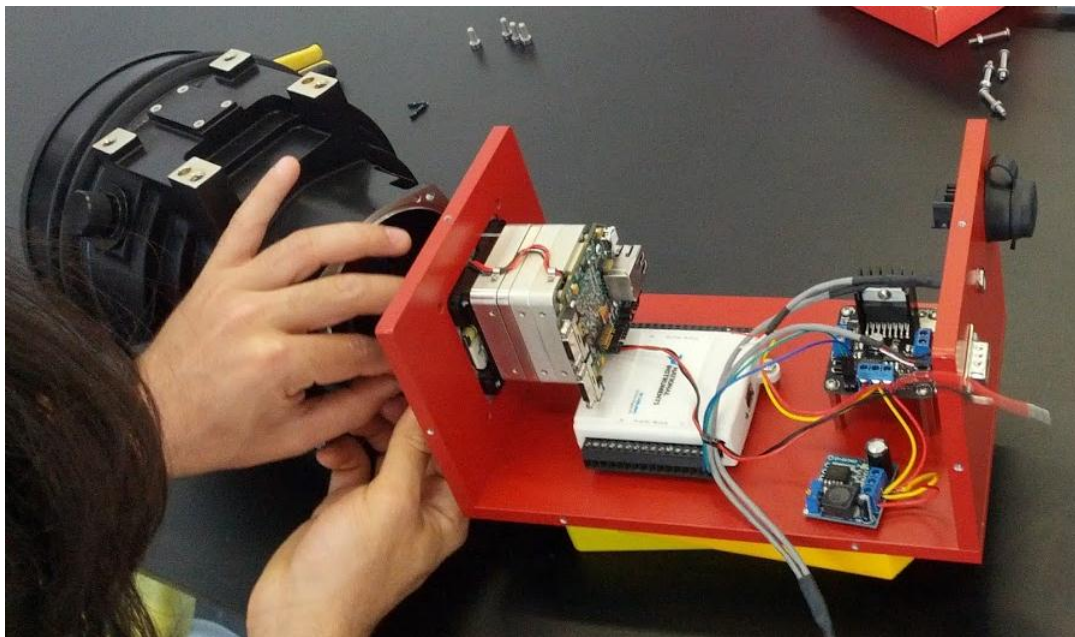


Figura 5.1-10 Cámara infrarroja en proceso de montaje, donde se pueden ver las distintitos componentes, detector infrarroja, placa de NI, convertor, puente H y la óptica

### 5.1.6.Equipos auxiliares

- Ordenador comercial con puerto PCI-express
- Tarjeta PCI-express de adquisición Imperx para camera link
- Cables

## 5.2. Aplicación a Termografía a larga distancia

El caso de termografía que nos planteamos resolver presenta dos grandes dificultades a la hora de realizar medidas de temperatura con una incertidumbre baja. Por un lado debemos corregir los posibles factores del entorno que afectan a nuestras medidas y por otro conseguir una imagen uniforme tanto en el tiempo como en el espacio.

Para poder resolver el problema hay que seguir una serie de pasos, que aun siendo los mismos que en una aplicación de termografía tradicional, presentan un mayor grado de dificultad como desarrollaremos a lo largo de este capítulo.

El esquema global de funcionamiento del sistema lo podemos ver descrito en la Figura 5.2-1

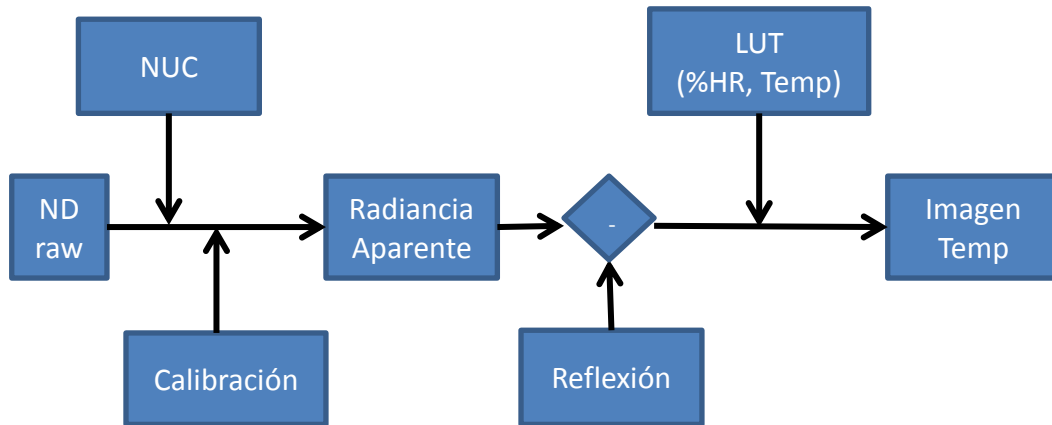


Figura 5.2-1 Esquema de funcionamiento del software de termografía de precisión a largas distancias



### **5.2.1. Corrección de no uniformidad en la imagen**

El primer paso en el tratamiento de imagen infrarroja es conseguir una imagen uniforme y que todos los pixel presenten una misma respuesta ante una misma energía incidente. En el caso que nos ocupa esta no uniformidad tiene dos componentes. Por un lado tenemos el efecto habitual de los detectores de infrarrojos en el cual la respuesta de los detectores no es exactamente la misma y por otro lado estos detectores presentan una variación en función de la temperatura en la que se encuentren.

### **5.2.2. Uniformización de la respuesta del detector**

Tras las primeras pruebas se comprobó que dada la complejidad del sistema óptico, los métodos tradicionales de uniformización que consisten en adquirir las imágenes de referencia posicionándolas justo enfrente de la lente, no son aplicables. Debido a que el mapa de irradiancia que se obtiene sobre el FPA no es igual cuando la referencia caliente está pegada a la lente que cuando está a una distancia que se puede considerar infinito. En este caso la aproximación de óptica paraxial no se cumple.

A la hora de realizar la corrección de no uniformización de la imagen hemos realizado una NUC a 2puntos. Para ello se toman dos imágenes de una superficie a dos temperaturas distintas y con ellas se calcula una matriz de ganancia y otra de offset que, aplicada a las imágenes, nos permite conseguir una mejor uniformización de la respuesta de los detectores.

Para poder solucionar el problema antes descrito se creó lo que denominaremos imágenes de referencias virtuales. El procedimiento, consiste en situar el cuerpo negro a una distancia mínima de enfoque e ir desplazando la cámara de forma que en algún momento en todos los pixeles de la imagen tengamos la imagen del cuerpo negro.

El proceso de creación de las imágenes de referencias virtuales:

1. Situamos el CN a una distancia superior a la distancia mínima de enfoque
2. Barremos la imagen de forma que en algún momento todos los pixeles de la imagen hayan pasado por el CN, tal y como muestra la Figura 1.1-1.
3. Procesado de la secuencia adquirida:

- a. Seleccionamos ND a partir del cual consideramos que no estamos dentro del CN.
- b. Erosionamos la imagen del CN, de este modo evitamos posibles errores debida a errores de enfoque y los pixeles del borde en los cuales no podemos asegurar que toda la radiación sea del CN y no haya contribuciones de los bordes Figura 5.2-3
- c. Promediamos para cada pixel todas las imágenes en la que este se encontraba el CN.
- d. Generación de Imagen virtual de Referencia.

El paso más crítico del proceso es tomar el número de imágenes suficientes y que en todos los pixeles de la imagen haya pasado el CN y de esta forma poder promediar.

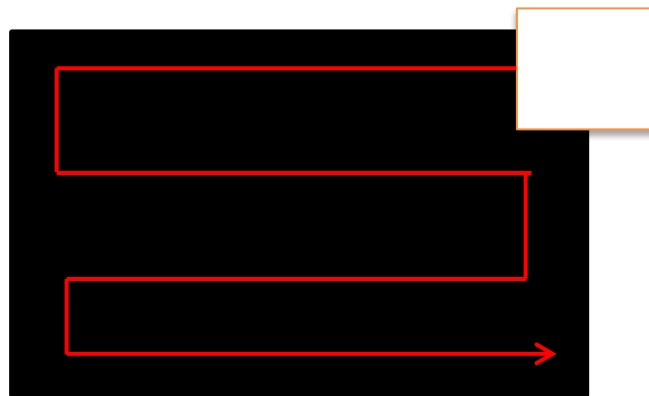


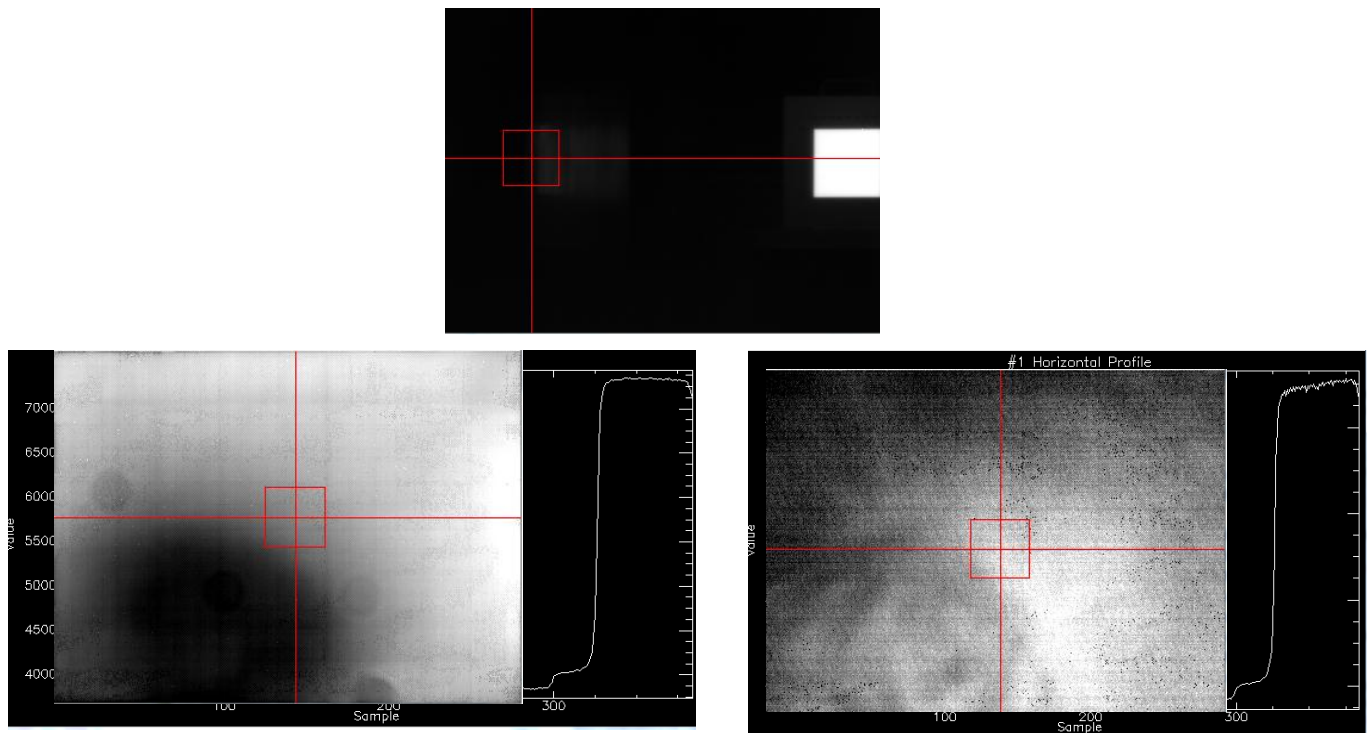
Figura 5.2-2 Ejemplo ilustrativo del recorrido del cuerpo negro en la imagen a lo largo de la secuencia de imágenes

Mediante la erosión de la imagen intentamos evitar zonas que podríamos llamar borrosas o zonas donde la energía que llega no tiene por qué ser solo debida al CN. Este efecto puede ser debido a un mal enfoque de la imagen o simplemente a los pixeles que se encuentra justo en el borde del CN y no todo el pixel pertenece al cuerpo negro. El efecto de una erosión lo podemos ver en la.



Figura 5.2-3 Ejemplo del proceso de erosión de una imagen de CN

En la Figura 5.2-4 podemos ver la diferencia de corrección de una imagen utilizando métodos tradicionales (derecha) y el método desarrollado para esta aplicación (izquierda). La forma más clara de ver las diferencias es colocando un CN en diferentes partes de la imagen y comprobando que la respuesta de los detectores es independiente de la posición. En el perfil de la izquierda podemos observar como el perfil horizontal realizado en la zona del CN se mantiene plano, lo que quiere decir que, ante una misma radiación, todos los pixeles dan el mismo valor de nivel digital. En cambio en el perfil de la izquierda se observa una variación de respuesta de los pixeles, este efecto es conocido como viñeteo.



**Figura 5.2-4** Arriba, imagen de CN. Abajo izquierda, Referencia caliente virtual creada en laboratorio y utilizada para corregir la imagen de CN, y perfil horizontal de la imagen de CN tras realizar la corrección. Abajo derecha, Referencia caliente adquirida mediante métodos tradicionales y utilizada para corregir la imagen de CN, y perfil horizontal de la imagen de CN tras realizar la corrección.

Este procedimiento solo lo necesitamos aplicar en la referencia caliente, la referencia fría no es necesario medirla mediante el método anteriormente descrito. Esto es debido a que la imagen que tomamos como referencia fría es una imagen del offset del sistema, de esta forma aseguramos que todos los pixeles reciben la misma energía.

### **Corrección de la deriva térmica de los detectores**

La respuesta de los detectores de infrarrojo es muy sensible a la temperatura del mismo. Este efecto se puede corregir de dos maneras distintas. La forma tradicional de corregir la deriva térmica de los detectores es obligando a que estos detectores siempre funcionen a la misma temperatura mediante algún sistema de refrigeración o de estabilidad térmica como puede ser un TEC (thermal electrical cooler). O mediante una corrección de este efecto mediante software.

No obstante, la tendencia de los sistemas actuales es prescindir de la etapa TEC, con el objeto de abaratar el producto y aligerarlo tanto en términos de masa y volumen

como de consumo. Pero, por otro lado, es necesaria la implementación de procedimientos y algoritmos que aseguren una correcta operación del dispositivo.

Dentro de la deriva térmica debemos diferenciar dos efectos, por un lado la no uniformidad residual, lo que implica que las correcciones de no uniformidad no se mantienen a distintas temperaturas y por otro lado a diferentes temperaturas del detector la respuesta de los detectores ante una misma energía incidente no es la misma y por tanto no se puede aplicar la misma calibración

Los detectores que se encuentran preparados para corregir este cuentan con una señal adicional a ambos lados de la imagen, los píxeles ciegos Figura 5.2-6. Esta salida corresponde a unos píxeles que se encuentran tapados Figura 5.2-7, y por tanto su respuesta es dependiente de la temperatura del detector.

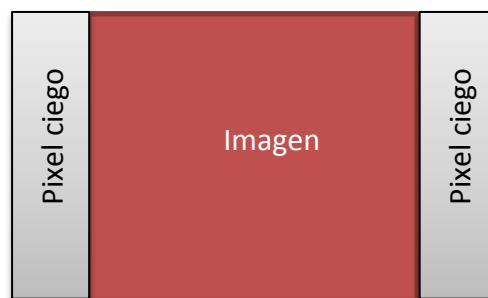


Figura 5.2-6 Salida digital de una cámara IR con píxeles ciegos

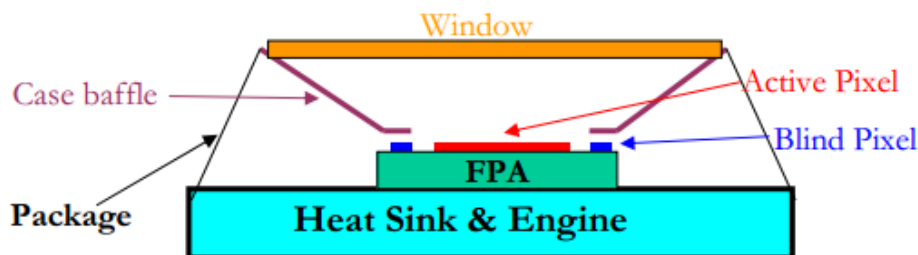


Figura 5.2-7 Esquema conceptual de montaje de un detector de microbolómetros (14)

Si se promedia la respuesta de todos los píxeles ciegos podemos obtener un valor que es proporcional a la temperatura del detector sin necesidad de mayor información que los bordes de la propia imagen.

## Procedimiento de corrección de la deriva térmica

### *Creación de diferentes NUC en función de la temperatura,*

- La matriz de ganancias se mantiene constante y es independiente de la temperatura.
- Matriz de offset varía con la temperatura y es necesario su actualización en función de su temperatura.

Esto implica que para poder corregir el efecto de la no uniformidad residual en la imagen debemos tener precargadas en el software, diferentes matrices de offset en función de la temperatura del detector. En la práctica, tendremos un número finito de matrices y para los casos intermedios interpolaremos los valores.

$$ND_{ij} = \text{GananciaNUC}_{ij} \cdot \text{NDraw}_{ij} + \text{offsetNUC}_{ij}(\text{Temp det}) \quad (5.2-1)$$

Dónde:

- $ND_{ij}$  es la imagen en niveles digitales tras corregir la no uniformización
- $\text{NDraw}_{ij}$  imagen en niveles digitales según sale del detector
- $\text{GananciaNUC}_{ij}$  matriz de ganancias, cada pixel tiene un valor diferente
- $\text{offsetNUC}_{ij}(\text{Temp det})$  matriz de offset, cada pixel tiene un valor diferente.

Esta matriz es función de la temperatura del detector.

### *Corrección de la respuesta del sistema.*

El otro efecto que presenta el detector con la temperatura es que la respuesta en niveles digitales no es la misma según tenga mayor o menor temperatura, Figura 5.2-8. Este efecto debe ser considerado y corregido para poder realizar una correcta calibración en radiancia del sistema.

Partiendo de una imagen uniformizada y con un cuerpo negro a una temperatura prefijada vamos modificando la temperatura del detector. Con ello podemos calcular la relación ND de cuerpo negro frente al ND del bolómetro ciego,(5.2-2).

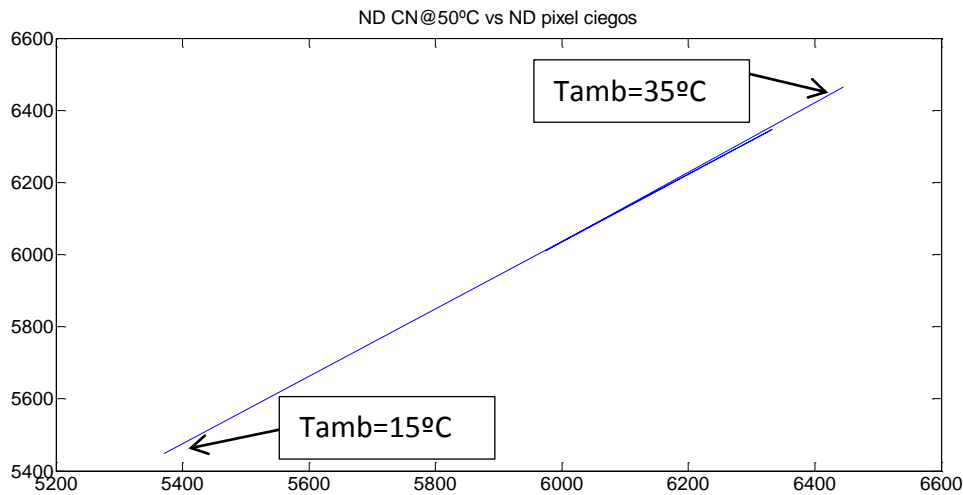


Figura 5.2-8 ND(CN@50°C) vs ND Bolometro ciego

En el tramo de temperaturas estudiado (temperatura ambiente entre 15 y 35°C) la respuesta de los detectores en función de los bolómetros ciegos se puede aproximar una relación lineal.

$$\text{Imagen corregida} = \text{ND}_{ij} + G_{\text{PixelCiego}} \cdot (\Delta \text{ND}_{\text{PixelCiego}}) \quad (5.2-2)$$

Dónde:

- $\text{ND}_{ij}$  es la imagen en niveles digitales tras corregir la no uniformización
- $G_{\text{PixelCiego}}$  es la pendiente de la curva de la Figura 5.2-8
- $\Delta \text{ND}_{\text{PixelCiego}}$  es la variación en niveles digitales respecto al valor que hemos tomado como referencia.
- Imagen corregida es la imagen infrarroja uniformizada y con los efectos térmicos corregidos.

### 5.2.3. Transmitancia atmosférica. LUTs

Una vez resuelto el problema de la uniformidad de la imagen. Nos queda resolver el problema de las variaciones atmosféricas. El sistema que debemos desarrollar para el proyecto debe funcionar en tiempo real y tener en cuenta todos los casos de condiciones atmosféricas que se pueden presentar en una localización determinada.

Modelar a tiempo real todos los posibles escenarios es algo demasiado abierto y complejo lo que dificulta la otra condición que debemos cumplir que el procesado se

realice en tiempo real. Por ello se ha optado por la parametrización de la transmitancia atmosférica.

El primer paso para modelar la atmósfera es definir los parámetros que más influyen a la hora de calcular la transmitancia atmosférica, se determinó que la humedad relativa y la temperatura ambiente son los factores que más influyen ya que están directamente relacionados con la concentración de agua en la atmósfera, lo que es el principal factor a tener en cuenta.

La transmitancia atmosférica, una vez seleccionados los parámetros de influencia (%HR, temperatura ambiente, localización), no resulta complicada su modelización de forma teórica. Para ello nos apoyamos de MODTRAN.

Mediante MODTRAN podemos simular la transmitancia atmosférica en la ubicación que nos convenga y en todas las condiciones atmosféricas que nos interesen. Para nuestro caso de estudio necesitábamos un camino óptico de 200 m y todas las condiciones atmosféricas posibles (%HR y  $T_{amb}$ ). Decidimos realizar simulaciones variando %HR de cinco en cinco de 0 al 100% HR y la temperatura de cinco en cinco de 0 a 50 °C.

### **Modelo teórico y su implementación a tiempo real**

Uno de los grandes problemas a los que nos hemos tenido que enfrentar, es el requerimiento de recuperar la temperatura de las imágenes en tiempo real, poder adaptarnos a las condiciones del entorno y todo ello mientras se guardan las imágenes en disco. Para resolver el problema se desarrolló una parametrización mediante Look Up Tables (LUTs).

El sistema de LUTs presenta dos grandes mejoras frente a otros sistemas utilizados en el laboratorio para conversión de radiancia a temperatura. Todos ellos se basan en realizar aproximaciones para simplificar el modelo, cosa que no ocurre con las LUTs. Además este método presenta una mayor velocidad a la hora del procesamiento de imagen. En LabView se comprobó que es mucho más rápido realizar una conversión de valores mediante LUTs que mediante diferentes operaciones matemáticas. Una LUT no deja de ser el mismo proceso que cuando cambiamos una paleta de color.



Ahora solo nos queda saber qué valores debemos usar para crear las LUTs. Estas tablas en función de las condiciones atmosféricas por lo que existirá una tabla para cada uno de los casos posibles de condiciones

El primer paso para poder calcular las LUTs es calibrar la radiancia aparente en cada caso, como se describe en (3.3-2). La energía que llega a nuestro detector corresponde a la energía emitida por el blanco, a la energía que puede reflejar y la energía proveniente de la atmósfera. La energía emitida por el sistema óptico por tener cierta temperatura en este caso no se tiene en cuenta pues esta energía es descontada durante el proceso de medida con el procedimiento de restar el offset.

Todos los datos anteriores son conocidos y nos permiten calcular para cada condición atmosférica y para cada temperatura del objeto a medir la radiancia que llega al detector. La ecuación (3.3-2) la dividimos en dos, por un lado los aportes por reflexión (5.2-4) y por otro el resto (5.2-3) quedándonos de la siguiente forma.

$$L_D = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} L_{obj}^{CN} \cdot \epsilon_{obj} \cdot (\tau_{atm} \cdot \tau_{optica} \cdot \tau_{filtro}) \cdot R_{det} + L_{atm} \cdot (\tau_{optica} \cdot \tau_{filtro}) \cdot R_{det} \cdot d\lambda \quad (5.2-3)$$

$$L_{reflexión} = L_{ext} \cdot \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} (1 - \epsilon_{obj}) \cdot (\tau_{atm} \cdot \tau_{optica} \cdot \tau_{filtro}) \cdot R_{det} \cdot d\lambda \quad (5.2-4)$$

En este punto realizamos la única simplificación en el modelo radiométrico al considerar  $L_{ext}$  constante en longitud de onda. Teniendo en cuenta que estamos utilizando un filtro estrecho y partiendo del hecho de que las fuentes de radiométricos pueden ser de origen desconocido es una solución de compromiso. De esta forma el error cometido no es muy grande y los procesos de cálculo no se ven complicados.

Por lo tanto tendremos una tabla para cada condición atmosférica que relaciona directamente temperatura del objeto con la radiancia en el detector más un factor al que multiplicar radiancia reflejada.

	L aparente[w/cm2sr]												T[K]	
Tem ambiente [°C]	0					5					10	[...]		40
HR [%]	0	5	[...]	95	100	0	5	[...]	95	100	0	[...]	100	
														300
														301
														[...]
														[...]
														[...]
														899
														900

Figura 5.2-9 LUT de búsqueda para la conversión de radiancia aparente a temperatura

La relación se podía haber realizado también para pasar temperatura a radiancia incluyendo dentro de las LUTs la calibración. Pero por el contrario en las LUTs solo están consideradas configuraciones físicas del sistema como es la óptica, los filtros utilizados y por supuesto la atmósfera. La relación que convierte los niveles digitales de respuesta del detector en radiancia depende de diversos factores y entre ellos está el tiempo de integración, un valor que suele ser cambiado con cierta frecuencia, el hecho de no incluirla nos da una mayor libertad para modificar los parámetros de configuración sin tener que volver a repetir todas las tablas utilizadas para calibrar en temperatura.

### Variaciones de la respuesta del sistema debidas a los factores ambientales

El sistema óptico emite una radiación que en muchas ocasiones no es despreciable, sobre todo cuando la temperatura ambiente de medida varía con respecto a la temperatura ambiente en la calibración. Por tanto debemos descontar su contribución.

Para solucionar este problema necesitamos adquirir una imagen (imagen offset) en la cual estamos tapando nuestra cámara con una superficie uniforme, que su radiación emitida se encuentre por debajo del offset, lo ideal es una superficie de baja emisión y baja reflexión, tapando la óptica de la cámara y que esta superficie se encuentre a una temperatura lo más baja posible. Con esto conseguimos una imagen de la que

podemos decir que la radiación que está recibiendo nuestro detector es debida a nuestro sistema óptico y llamaremos imagen de offset

La corrección de los efectos debidos a la temperatura consiste en restar la imagen tomada de offset a todas las imágenes siguientes, (5.2-5), descontando de esta manera lo que es conocido como el offset del sistema.

$$\text{Imagen} = \text{Imagen original uniformizada} - \text{Imagen de offset} \quad (5.2-5)$$

Entendiendo como imagen original uniformizada una imagen a la cual ya se le han aplicado los procedimientos de corrección de la no uniformidad y la imagen de offset también se encuentra uniformizada.

Este procedimiento de medida se debe realizar tanto en las medidas en campo como en la calibración del sistema para de esta forma saber que la radiación que estamos midiendo en el detector es debida únicamente al objeto que estamos midiendo.

#### 5.2.4.Procedimiento de medida

La parte más importante del proceso de medida es realizar todo de una forma correcta para evitar posibles errores.

1. Partimos de la imagen raw que nos llega al ordenador por medio de la tarjeta de adquisición de cameralink
2. Uniformizamos la imagen mediante una referencia caliente precargada en el sistema, la referencia fría se toma en el momento de comenzar la medida, y debe ser actualiza cada 30 minutos.
3. Restamos imagen de offset, para evitar los posibles efectos de la temperatura del equipo a la hora de realizar las medidas. Esta imagen se debe actualizar cada 30 minutos
4. Convertimos los niveles digitales a radiancia, para ello utilizados los valores de calibración calculados en el laboratorio.  $\text{Radiancia} = (\text{ImgRaw} - \text{offset}) / \text{Gain}$ .
5. Mediante las tablas precargadas en el sistema y después de una correcta selección de las condiciones atmosféricas convertimos a temperatura.

### 5.3. Aplicación de visualización de gases

El trabajo desarrollado en este punto parte de desarrollos realizados en el grupo en otros proyectos. En este trabajo se ha llevado a cabo una depuración del diseño y se ha dotado al mismo de mayor capacidad de integración. También se han incluido algunas mejoras que permiten una visualización del gas de forma más nítida.

Para entender los procesados que debemos realizar para intentar mejorar la visualización del gas, lo primero que debemos comprender es que ocurre en una imagen cuando hay gas y cómo se comporta éste.

Tenemos dos efectos muy claros y de los cuales debemos intentar aprovecharnos para mejorar la visualización del gas.

- Lo más habitual es que presente movimiento frente a un fondo estático. Por lo general el fondo no se mueve más allá del movimiento que pueda realizar el operario con la cámara y por el contrario los gases están en continuo movimiento.
- El segundo efecto destacable es que el gas presenta unas variaciones de señal muy bajas con respecto al fondo, cuando este está a una temperatura del orden a la del fondo

Partiendo de estas dos características vamos a definir los principios de los dos procesados de imagen que se han implantado.

- Búsqueda de posibles variaciones de radiación infrarroja provenientes de gas con la firma espectral seleccionada para su visualización.
- Amplificación de la señal para evitar falsas alarmas.

## 5.4. Desarrollo Software

Para poder aplicar todos los procedimientos que se requerían para poder llevar a cabo la medición de la temperatura en tiempo real era imprescindible la creación de un software personalizado y que cumpliese todos los requisitos que nuestra aplicación requería.

- Visualización de imagen en tiempo real.
- Corrección de la no uniformidad de la imagen, NUC.
- Corrección en temperatura para distintas configuraciones de camino óptico.
- Creación de Rois tanto temporales como espaciales.
- Matriz de Rois Rois que den valores de máximo mínimos y medias tanto en ND como en temperatura.
- Control del enfoque de la óptica y autofocus.
- Ajuste del rango dinámico de visualización
- Adquisición de largos periodos de tiempo y visualización simultanea de la imagen

### 5.4.1.Estructura

Todo programa desarrollado en Labview consta de un panel frontal Figura 5.4-1, en el cual el usuario puede interaccionar con él. En la Figura 5.4-2 se explica mediante un diagrama de flujo la estructura del software realizado, en la parte central de este se puede ver donde se realizan todas las operaciones. Mediante labview y una programación en paralelo conseguimos un mejor aprovechamiento de los recursos del ordenador al utilizar de forma simultánea todos los procesadores de los que disponga el ordenador.

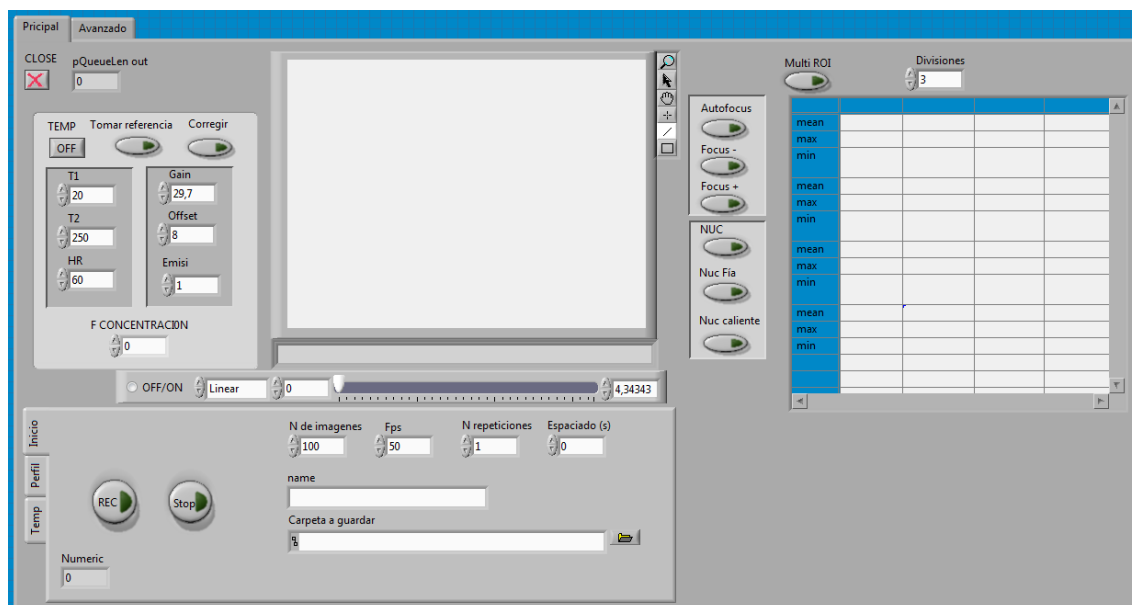


Figura 5.4-1 Panel frontal del programa desarrollado para la medición de la temperatura

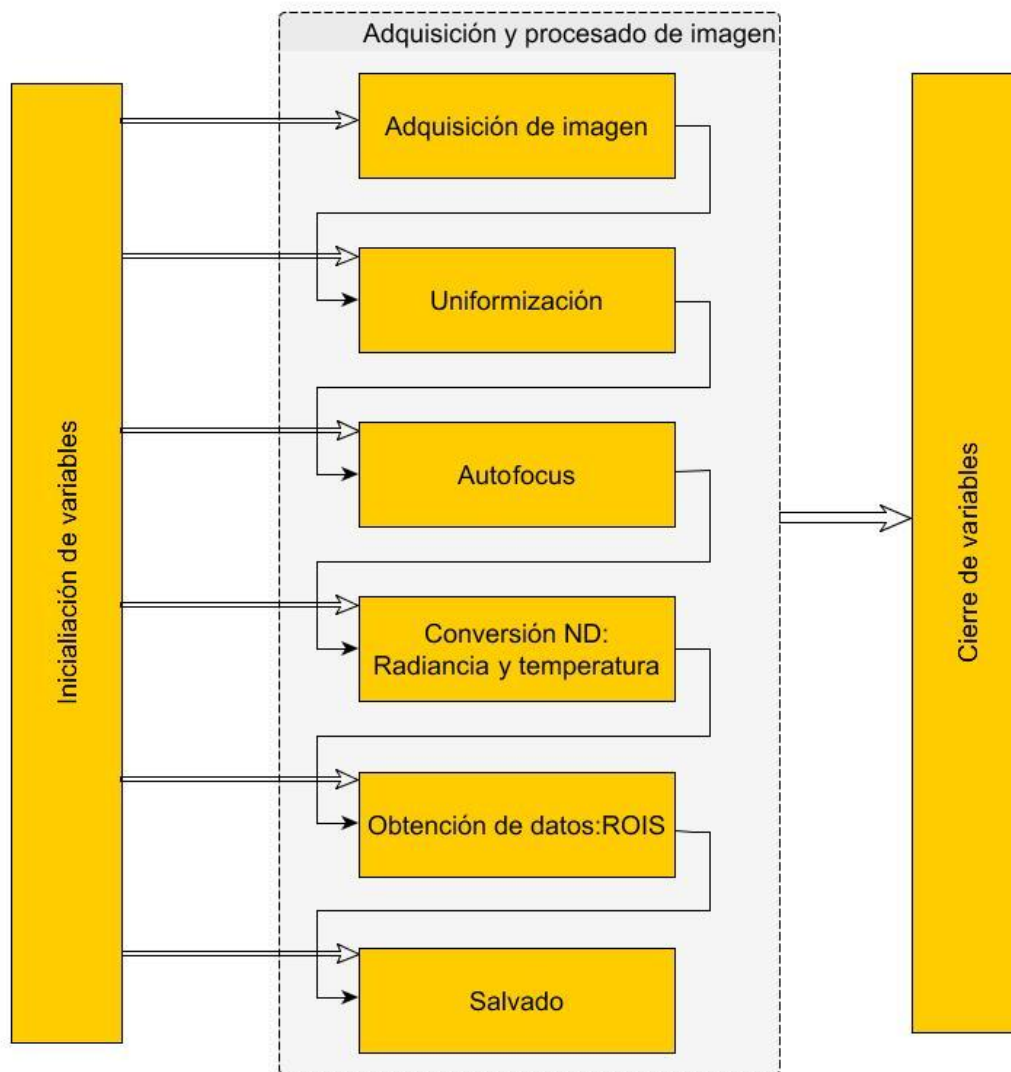


Figura 5.4-2 Diagrama de bloques en el que se explica el funcionamiento del software desarrollado para la aplicación de medir temperaturas a largas distancias

### 5.4.2. Inicialización de variables y adquisición de imagen

En esta parte se inician todas las variables que vamos a usar en el programa. Y la parte más importante es comenzar la comunicación con la tarjeta Imperx la cual nos ira entregando las imágenes según las vaya recibiendo de la cámara y el programa las vaya solicitando. Un dato importante es que la cámara tiene una cola de imágenes, si por el motivo que fuese en algún momento el programa fuese más despacio de la tasa de adquisición de la cámara y no pidiese las imágenes a la tarjeta con una suficiente velocidad, las imágenes no se perderían.

### 5.4.3. Corrección de la uniformización de la imagen

El primer paso de todos para poder trabajar con imágenes infrarrojas es uniformizar las imágenes. Ya sea mediante una corrección a un punto o a dos puntos. En el software esta implementada solo funcionalidad de referencia a 2 puntos.

Existen dos formas de trabajar, la primera y más rápida es utilizar unas imágenes guardadas por defecto como referencia fría y caliente. Pero en cualquier momento nosotros podemos tomar una referencia tanto fría como caliente. En el caso de estudio se recomienda actualizar solo la referencia fría pues como ya hemos visto anteriormente una referencia caliente valida resulta complicada de obtener y es necesario obtenerla en el laboratorio. Si por el motivo que fuese hemos adquirido unas referencias en el momento pero queremos volver a las referencias almacenadas en memoria solo tendríamos que reiniciar el software

La parte del panel frontal dedicada a controlar estos procesos la podemos ver en la Figura 5.4-3. En ella se ve el boton de activación (NUC) y los boteones para adquirir tanto la refencia fría como la caliente (Nuc Fría, Nus Caliente). Las referencias se crean con un promedio de 20 imágenes para evitar posible ruido en la imagen.

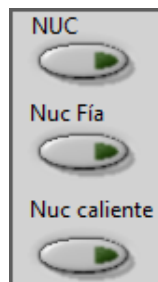


Figura 5.4-3 Controles de No Uniformidad de la imagen

### 5.4.4. Autofocus y control de la óptica

Una de las necesidades de nuestro sistema es controlar el motor de la óptica para poder enfocar la imagen.

En esta parte se desarrolló el control para realizar un control manual de la misma, pero luego se decidió implementar un autofocus.

El control de la óptica consta de dos botones (Focus+ y Focus -), Figura 5.4-4. Con estos dos botones lo único que se puede hacer es acercar o alejar la óptica.



El funcionamiento del motor de la óptica es guiado mediante un puente H este a su vez es controlado mediante una placa de propósito general de National Instruments, en la cual generamos dos señales analógicas (0-5V), una para adelantar la óptica y la otra para retraer la misma.

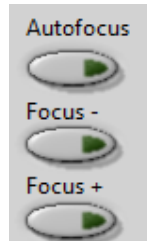


Figura 5.4-4 Controles de la óptica y autofocus del sistema

### *Algoritmo de autofocus*

El algoritmo busca enfocar la zona que nosotros hayamos seleccionado mediante un ROI, y en el caso de que no hayamos seleccionado ninguna ROI utilizaremos la zona central de la imagen.

Para poder enfocar el criterio más adecuado consiste en maximizar la desviación estándar en los bordes de los objetos. Para ello se utilizara la zona anteriormente seleccionada que queremos enfocar e intentar maximizar la desviación estándar.

Este problema tiene cierta complejidad pues en muchos casos el ruido de la propia imagen dificulta conseguir el máximo real, pues el caso de falsos positivos es muy grande. Para solucionar el problema se optó por no buscar el máximo sino el caso en el que la desviación ya ha comenzado a descender. Esto no supone un gran problema a la hora de enfocar aunque bien es cierto que en algunos casos el enfoque no es ideal. Por otro lado no tenemos control sobre el fin de carrera del motor de la óptica cosa que también deberemos tener en cuenta, lo que solucionamos teniendo en cuenta el tiempo máximo que el motor puede estar en funcionamiento en cada dirección. El esquema de funcionamiento del autofocus lo tenemos detallado en Figura 5.4-5.

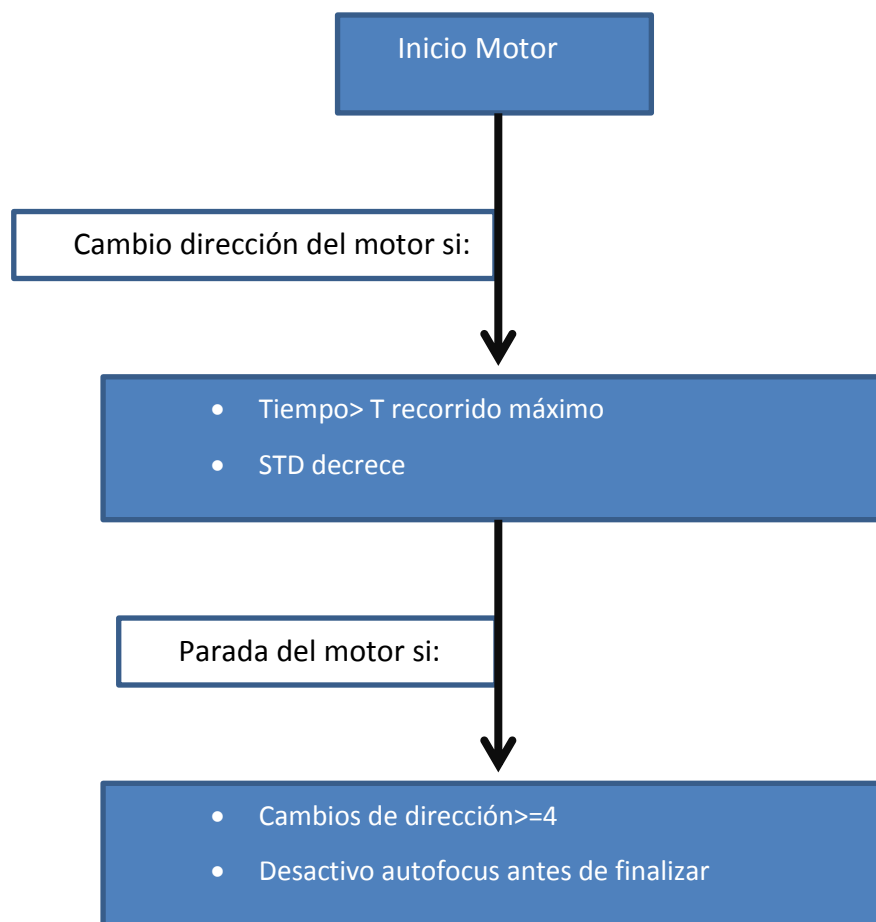


Figura 5.4-5 Diagrama de flujo del programa de control del autofocus

## 5.4.5. Procesado de imagen

### Calibrado de imagen en radiancia y temperatura

Como ya hemos visto el fin último del software es permitir la visualización en tiempo real de la imagen en temperatura. El primer paso para conseguir esto es convertir los niveles digitales de imagen a radiancia, esta conversión es muy sencilla.  $\text{Radiancia} = (\text{Gain} - \text{offset}) / \text{ND}$ . La parte complicada del proceso es convertir la radiancia a temperatura en función de las condiciones atmosféricas de momento. Para ello introducimos en el control Figura 5.4-6 los datos de temperatura y humedad. El software con esos datos busca las tablas de conversión de radiancia a temperatura y recorre todos los píxeles convirtiendo los valores de radiancia en temperatura.



Figura 5.4-6 Control de conversión de ND a radiancia y temperatura

Aunque este es el procedimiento que hemos desarrollado a lo largo de este proyecto, hay otros métodos para convertir los valores de radiancia en temperatura. Aunque para esta aplicación se descartaron pues con ellos cometes un mayor error en la medida. Tanto el método de los BRFs como el método mediante polinomio han sido implementados en el software multifuncional que también hemos desarrollado.

#### 5.4.6.Utilidades para el estudio de las imágenes

Una de las necesidades para poder interpretar mejor los datos de las imágenes es la posibilidad de hacer ROIs y ver los valores que en ellos hay. Se implementaron diferentes tipos de ROIs.

ROIs temporales: dentro de una roi se puede ver como varían la media, mediana, mínimo, máximo, desviación estándar.

ROIs espaciales: Los valores que se pueden obtener son los mismos, la media, mediana, mínimo, máximo, desviación estándar, pero con un carácter espacial.

Las multiROIs, son una variación de ROI espacial. El funcionamiento se basa en tu haces una ROI cuadrada y el software lo divide en tantas divisiones como tengas especificadas, Figura 5.4-7 y de cada una de esas divisiones te ofrecen máximo, mínimo, y la media.

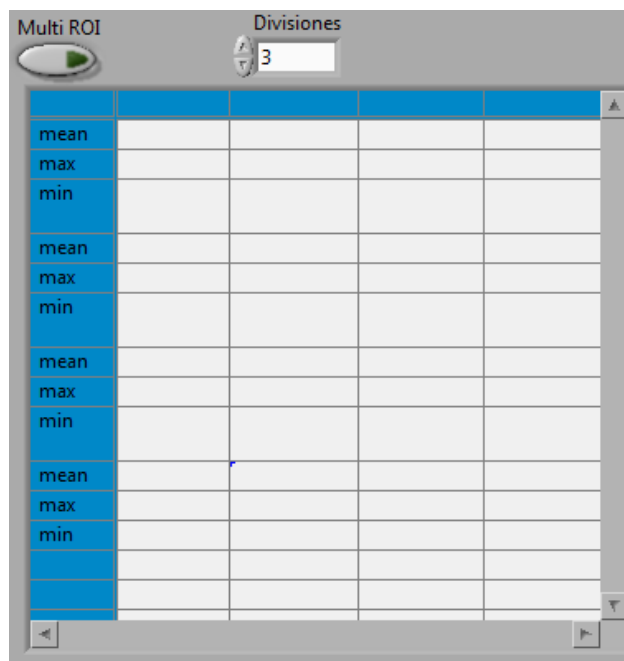


Figura 5.4-7 Control y visualización de Multi ROI

### 5.4.7. Visualización de imagen

El último paso de todos es la visualización de la imagen. Para dotar de unas características extras a la visualización de la imagen se han añadido diferentes funcionalidades que pueden permitir una mejor comprensión de lo que está ocurriendo en el escenario.

- Ajuste de la ecualización de visualización de la imagen
  - Ajuste del límite superior e inferior
  - Linear,  $1/x$ ,  $\log(x)$   $\exp(x)$ ,  $\sqrt{x}$ .
- Paleta de colores

### 5.4.8. Salvado de imágenes a disco

Una de las partes más importantes a la hora de hacer medidas con cámaras infrarrojas es el guardado de imágenes. El primer problema que nos presenta esto es que el sistema requiere de muchos recursos para poder guardar las imágenes y estos recursos dejan de estar disponibles para el resto de procesos del software. El otro gran problema es el espacio que ocupan las imágenes. Al contrario que las imágenes visibles a éstas no se les realiza ningún tipo de compresión para evitar la pérdida de información. A modo ilustrativo una secuencia de 1segundo (50 imágenes) ocupa 20MB de memoria. Teniendo en cuenta que nuestro sistema debe funcionar en

continuo durante un día entero eso supondría un exceso de información y complicaría mucho un tratamiento posterior de las imágenes, si éste fuese necesario. Para solucionar estas complicaciones se idearon una serie de parámetros que el usuario puede modificar como podemos ver en la Figura 5.4-8.

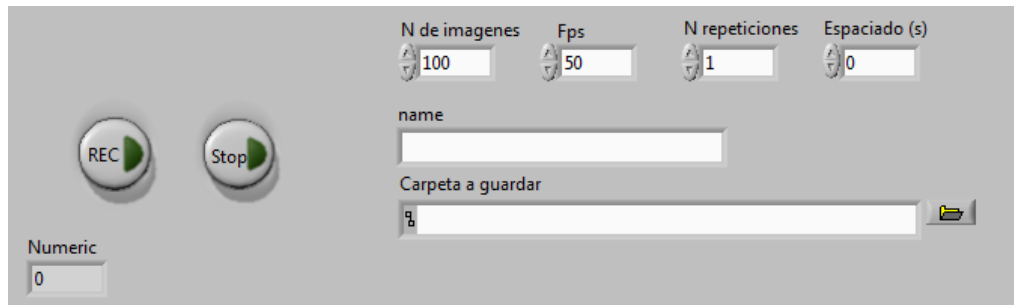


Figura 5.4-8 Controles del sistema de adquisición de imagen

#### Opciones de salvado

- Nombre archivo
  - El archivo se guarda con nombre seleccionado más la fecha en la que se realiza la adquisición.
    - NOMBRE\_HHmmssMMAAAA
- Path
  - Ubicación donde se guardan los archivos

#### Opciones de adquisición

- Número de frames por segundo:
  - Limitado a 50 fps debido a que es la máxima velocidad de adquisición de la cámara.
- Tiempo de adquisición(s):
  - Las imágenes se guardan en bloques de 500 imágenes pero este dato se puede modificar hasta un máximo de 1000 imágenes. Se recomienda no variar este parámetro para evitar problemas de recursos del ordenador.
- Número de adquisiciones:
- Intervalos entre adquisiciones:

#### Ejemplo de configuración

Si quisiéramos tomar una secuencia a 10 fps durante un minuto cada 5 minutos y hacer esto durante una hora tendríamos que configurarlo de la siguiente manera

10 fps durante 60 segundos y con intervalo entre adquisiciones 2400 segundos  
número de adquisiciones 12

Todos estos parámetros buscan permitir al usuario guardar solo las imágenes que puedan resultar significativas para su estudio posterior, evitando trabajar con datos redundantes que no aportan información extra.

Aparte de las imágenes se crean unos archivos adicionales que son necesarios para poder trabajar con las imágenes a posteriori de una forma cómoda y sencilla.

- Referencia fría y caliente
  - En el caso de que se hayan adquirido alguna de estas imágenes estas se guardan para poder usarlas a posteriori.
- Cabecera
  - Es un archivo adicional en el cual viene especificado el número de imagen los pixeles de cada imagen, el tipo de dato y el empaquetado de los mismos.

## **5.5. Desarrollo software multifuncional**

Uno de los objetivos planteados en este proyecto era la creación de un software modular Figura 5.5-1, que permitiese su fácil modificación y reutilización de las distintas funcionalidades que en él se incluyesen, ya sean desarrolladas a lo largo de este proyecto como ya existentes en el laboratorio.

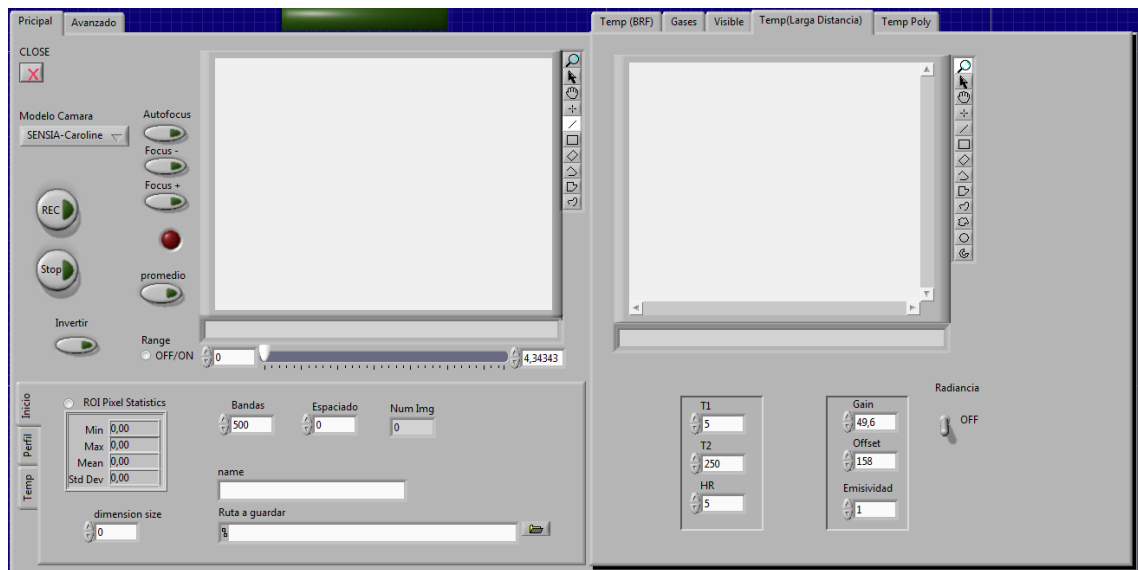


Figura 5.5-1 Interfaz del software multifuncional desarrollado

El software desarrollado consta de todas las funcionalidades antes descritas, pero a ellas debemos añadir:

- Procesado de imagen para la visualización de gases.
- Conversión de radiancia a temperatura por el método de los BRFs.
- Conversión a temperatura por medio de un polinomio de tercer grado.
- Visualización simultanea imagen visible.
- Otras cámaras existentes en el laboratorio.

Para la realización de este software se partió de la versión ya descrita en el apartado anterior. A la cual solo hemos tenido que hacer ligeras modificaciones y añadir los nuevos procesados. Otra de las funcionalidades extras añadidas es que se visualiza de forma simultánea nuestra imagen corregida mediante una NUC y la imagen procesada.

Para poder incluir todos los cambios, se modificó la gestión de inicialización por una con varias opciones, y en el apartado de procesados de imágenes hemos incluido los nuevos procesados.

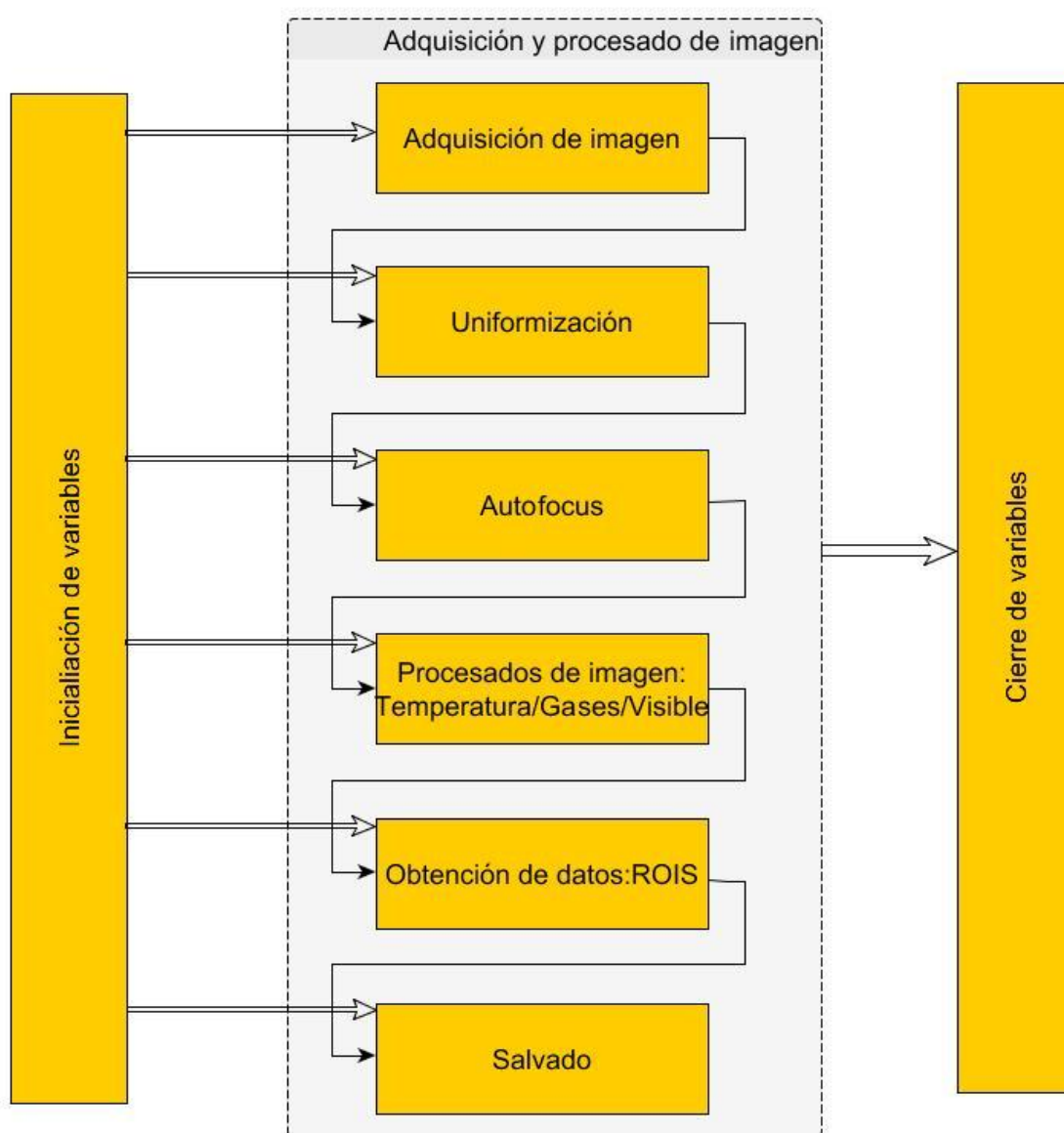


Figura 5.5-2 Diagrama de bloques, software multifuncional

### *Procesados la visualización de la temperatura*

Aparte del procedimiento ya declarado hemos añadido dos nuevos procesados. Estos procesados tienen una clara ventaja frente al anterior y es que no necesitan tener unas tablas precargadas. Por otro lado para poder estimar las pérdidas de radiancia debida a la atmósfera se ha añadido un parámetro multiplicativo TAU, que va de 0 a 1.



En la Figura 5.5-3 vemos el panel de control donde podremos hacer un ajuste polinómico para convertir de radiancia a temperatura mediante un polinomio de tercer grado.

Para conseguir la temperatura solo hay que aplicar unas ecuaciones sencillas.

$$\text{Radiancia} = ((\text{ND} - \text{offset}) / \text{Gain}) / \text{Tau} \quad (5.5-1)$$

$$\text{Temp} = (a \cdot R^3 + b \cdot R^2 + c \cdot R + d) / \text{emisividad} \quad (5.5-2)$$

Dónde:

- a,b,c,d son constantes calculadas en una calibración previa.
- R es la radiancia medida.

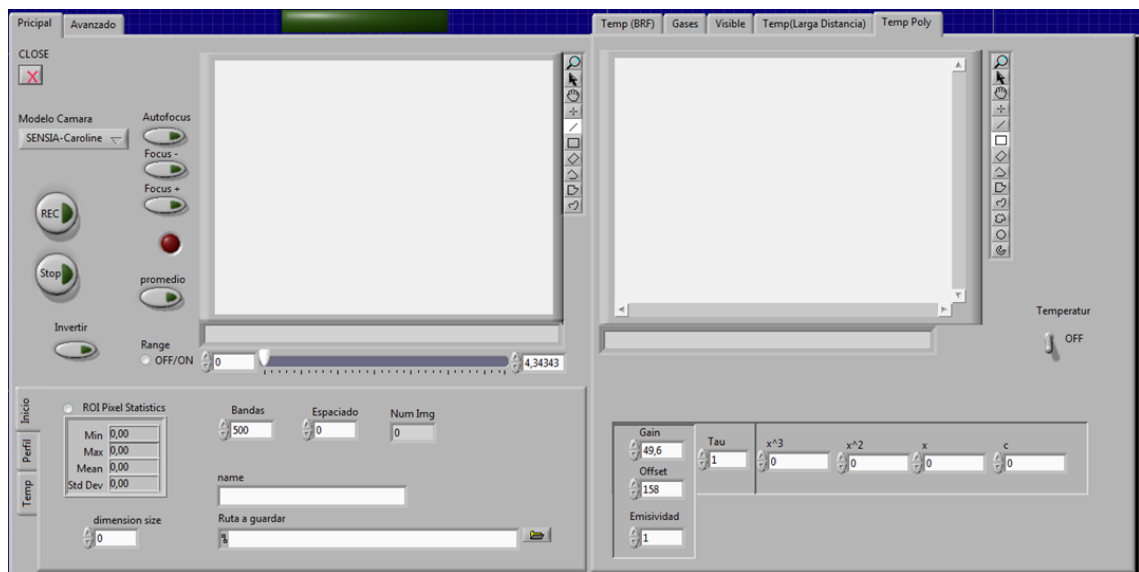


Figura 5.5-3 Procesado de imagen infrarroja para convertir ND en temperatura por medio de un ajuste polinómico

El otro metodo esta basado en una aproximación de la integra de la ecuación de Planck (1.3-1) entre dos longitudes de onda dadas. (1).

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{L} + F\right)} \quad (5.5-3)$$

Donde:

- B, R, F, son constantes que el usuario debe introducir. *factor de respuesta* R, el *factor espectral* B y el *factor de forma* F
- L es la radiancia

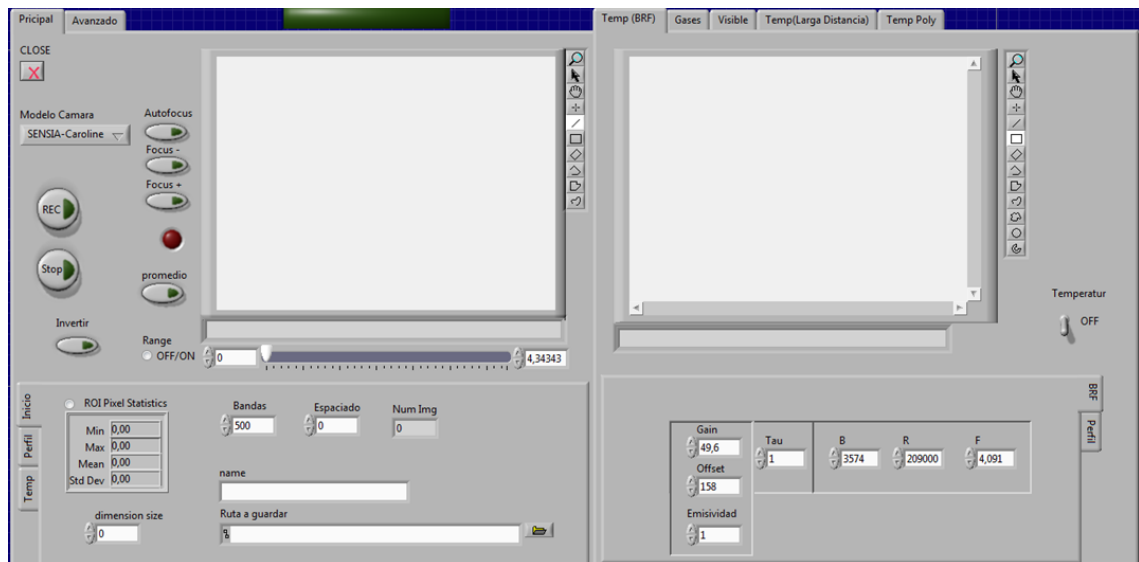


Figura 5.5-4 Procesado de imagen infrarroja para convertir ND en temperatura por medio de un ajuste de BRFs

Ambos procesados requieren de un trabajo previo para el cálculo de los coeficientes.

### *Procesados de imagen infrarroja para la visualización de gases*

Como ya hemos explicado anteriormente este procesado de dos partes. La primera en la que se busca conseguir un mayor contraste de la imagen y una segunda en la que se busca eliminar la energía procedente del fondo y quedarnos solo con la imagen. A estos procesados debemos añadir una modificación del hardware de la cámara para mejorar el límite de detección del sistema.

A nuestro sistema le hemos añadido una fuente de iluminación infrarroja. Con esto lo que perseguimos es aumentar la diferencia de señal que tenemos entre las zonas con gas y las zonas que no tienen gas. Este método de realce del contraste es especialmente indicado en los casos en los cuales el gas se encuentra a una temperatura muy similar a la del fondo de nuestra imagen. (15)

En la Figura 5.5-5 podemos ver el panel de control para el procesado de gases. En el que debemos mencionar dos formas de funcionar.

- Adquirimos una única imagen y esta la restamos a todas las imágenes posteriores

- A la imagen que estamos visualizando se le resta una imagen anterior que se puede regular mediante el botón de separación temperar y a esta imagen la multiplicamos por un factor.  $Imag = I_{mg} - I_{mg}(t-x) \cdot \text{escalado de fondo}$ .

En ambos procesados podemos intentar aumentar el stretching.

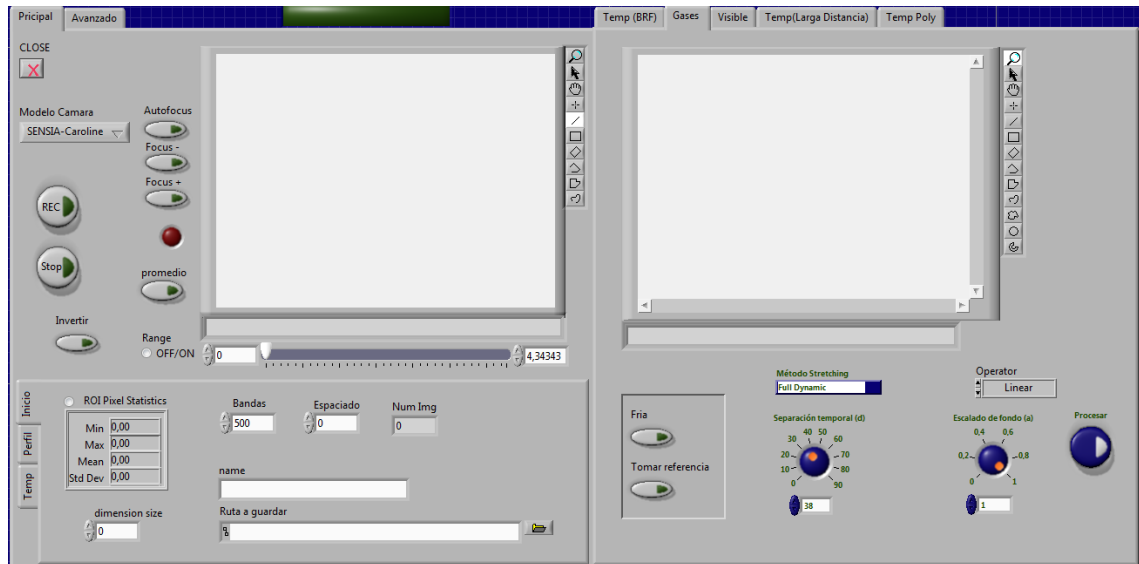


Figura 5.5-5 Procesado de imagen infrarroja para el realzado de gases

### Visualización de imagen visible

En muchas situaciones para el usuario de un sistema infrarrojo es difícil identificar qué es lo que está viendo, ya que pasas de ver formas y colores a formas y zonas con mayor o menor temperatura. Esto no siempre es muy intuitivo y para poder corregir este problema, se ha implementado la posibilidad de visualizar, de forma simultanea, una imagen visible dentro de la cual está encuadrada la imagen infrarroja.

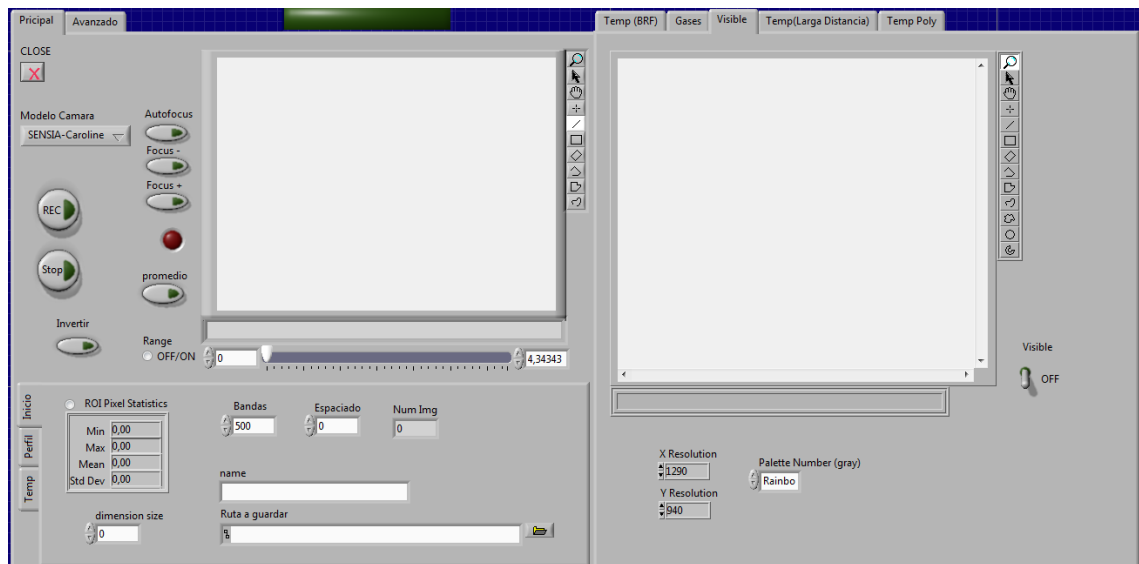


Figura 5.5-6 visualización de imagen visible, para facilitar una localización de la imagen infrarroja

## 6. Campaña de medidas y validación

---

### 6.1. Termografía a largas distancias

La validación del sistema se realizó frente a un cuerpo negro a distintas distancias de 20 a 200m y distintas temperaturas de 300 a 550°C.

#### 6.1.1. Primera campaña de medidas

En un primer momento el sistema de medida de la temperatura se validó en laboratorio con una atmósfera estable y a una distancia de 22 m. En estos primeros ensayos el objeto de las medidas era comprobar la robustez del sistema, así como testear el software en un caso real de funcionamiento.

Durante el ensayo el operario que estaba utilizando el software no sabía la temperatura del cuerpo negro.

Para este ensayo se generaron unas LUTs teniendo en cuenta la distancia de 22 m.

Error de medida obtenido de forma experimental a una distancia de 22 m es menor a un 0,5 %

#### 6.1.2. Segunda campaña de medidas

En una segunda fase de la validación el objetivo era comprobar el sistema en unas condiciones más realistas de operación.

Para ello la campaña de medidas se realizó en exteriores a lo largo de toda una mañana donde las condiciones climáticas variaron de forma significativa, temperatura ambiente inicial de 12 °C, temperatura ambiente final de 21 °C, la humedad varió entre 20 y 30 %HR.

Los ensayos se realizaron a distintas distancias: 50 m, 100 m, 150 m, 200 m

Distancia[m]	Error de medida [%]
50	< 0,5
100	< 0,5
150	< 1
200	2

Hasta los 100m de distancia el error en la medida se encuentra dentro de las estimaciones de error realizado pero, en cuanto aumentamos esta distancia, el error se dispara. El aumento del error es debido a la perdida de resolución con la distancia. Efectos que no se contemplan a lo largo de este proyecto.



Figura 6.1-1 Campaña de validación sistema de termografía para largas distancias

## **6.2. Detección de fuga de gases**

Para la detección de un gas hay tres factores claves, la diferencia de temperatura con respecto al ambiente, la concentración y el tipo de fondo.

Como es lógico partimos del caso más favorable y vamos complicando nuestro escenario de medida. Para ello desarrollamos un banco de experimentos que consistía en un tubo de cobre con varios agujeros de distinto grosos y que nos permitía calentar el tubo para conseguir que el gas saliera a una temperatura más elevada. En un primer momento todas las medidas se realizaron con dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

### **6.2.1.Campaña de medidas en laboratorio**

Las medidas en laboratorio se caracterizan por poderlas realizar en un entorno controlado. Los ensayos se realizaron en condiciones controladas de temperatura entorno 20 °C a 3 m de distancia de la fuga, con una focal de 35 mm y con un fondo uniforme. El gas empleado en los ensayos fue SO<sub>2</sub> con una temperatura máxima de

40 °C a una concentración del 3 %. Las mediciones de temperatura se realizaron mediante la utilización de un termopar.

### *Ensayos sin fuente radiante.*

Límite de detección: En los ensayos se determinó que la mínima fuga es de 1,5 mm.

### *Ensayos con fuente radiante.*

Una de las cuestiones a abordar en este proyecto es la utilidad de una fuente radiante como sistema de mejora en la teledetección de fugas gases.

Límite de detección: Se detectaron todas las fugas realizadas en el banco de pruebas, demostrándose que el límite es menor a 0,5mm de fuga.

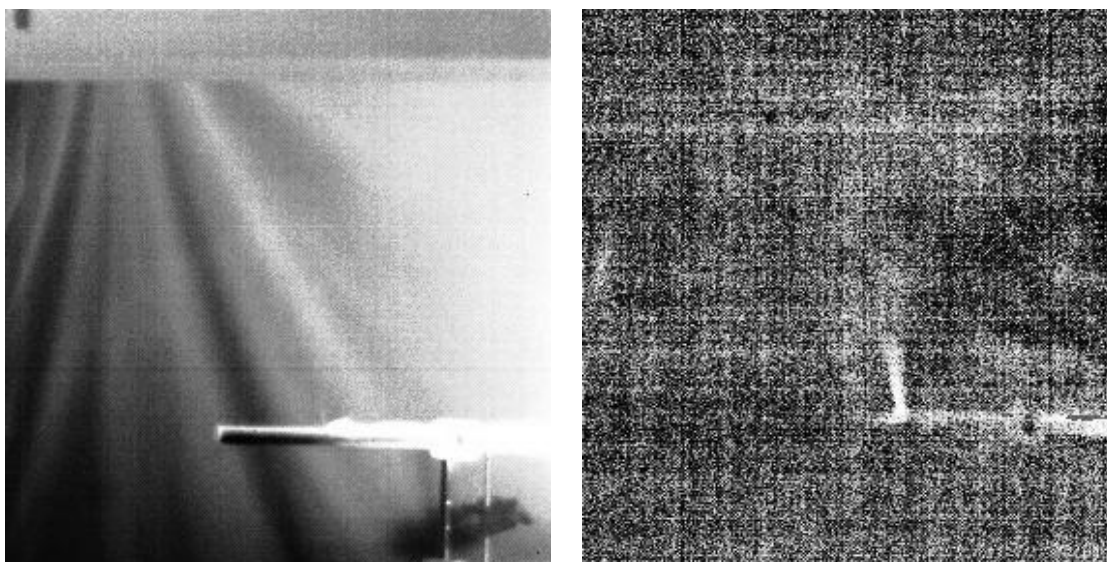


Figura 6.2-1 Ejemplo de fuga de  $\text{SO}_2$ , Izquierda imagen sin procesar. Derecha imagen procesada

## **6.2.2.Campaña de medidas en exteriores**

El mayor problema que puede suponer trabajar en un ambiente no controlado es el tener un fondo de imagen poco estable. En este caso no se aplica la fuente radiante, pues los ensayos se realizaron en condiciones donde la fuente no aumenta el rango de detección. Se realizaron ensayos a 3 m y 20 m de distancia de la fuga, para compensar la pérdida de resolución a 20 m se utilizó una óptica de mayor focal.

Los límites de detección no se vieron afectados por encontrarnos en exteriores.

## 7. Conclusiones y trabajos futuros

---

### 7.1. Conclusiones

A lo largo del proyecto se han abordado y conseguido con éxito los objetivos planteados.

Se ha establecido y llevado a cabo una metodología para la integración de los diferentes componentes hardware de un sistema de imagen espectral infrarroja.

Se ha desarrollado un software versátil y modular que permite su adaptación e incorporación de nuevas funcionalidades. A este software se le han incorporado distintas utilidades ya existentes (BRFs, ajuste polinómico, procesados de gases) y se ha desarrollado una aplicación específica para termografía a larga distancia.

El desarrollo se ha aplicado a la medida precisa de la temperatura a larga distancia y a la visualización de gases.

Se han establecido nuevos procedimientos para la medida cuantitativa en infrarrojo para nuevos sensores no refrigerados ni termoestabilizados, basados en la lectura de los píxeles ciegos del detector. Dicho procedimiento permite obtener una medida mucho más robusta frente a variaciones de la temperatura ambiente.

Se ha adaptado el software existente de detección de gases a cámaras de infrarrojo térmico para la detección de  $\text{SO}_2$ , gases refrigerantes y metano. Además se han añadido funciones de amplificación del contraste de visualización para una óptima detección así como se han incorporado fuentes de iluminación del escenario IR para optimizar la relación entre la señal del fondo y del gas.



## **7.2. Trabajos futuros**

### **HARDWARE**

Normalización de procedimientos de integración de componentes

Incorporación de electrónica embebida que permita implementar funciones de procesado a nivel hardware

Incorporación de elementos pasivos de disipación de calor en el interior del encapsulado de la cámara

### **SOFTWARE**

Desarrollar una plataforma software versátil, en un entorno de desarrollo de bajo nivel y de mejores prestaciones, como C++ o similar.

### **APLICACIÓN A TERMOGRAFÍA DE LARGA DISTANCIA**

Incorporación de un sistema realimentado con datos provenientes de una estación meteorológica para la corrección automática de los factores ambientales

Estudio de la influencia en el valor de temperatura recuperado de la pérdida de resolución espacial con la distancia

Desarrollo de un sistema autónomo y desatendido para su operación continua.

### **APLICACIÓN A LA DETECCIÓN DE GASES**

Desarrollo de un sistema multiespectral infrarrojo de detección automática de fugas, con alta probabilidad de detección y baja tasa de falsa alarma

Implementación de procedimientos para la medida cuantitativa de fugas (litros/min), para el apoyo a la toma de decisiones

Implementación de procedimientos para la detección de fuentes contaminantes: industria, tráfico, viviendas...

Adaptación de los procedimientos de medida típicos de sistemas refrigerados a sistemas no refrigerados de menor coste

## 8. Bibliografía

---

1. **Gallego, J.M.A.** *Tesis doctoral:espectrometría de imagen en el infrarrojo:una contribución al estudio de las combustiones y a la teledetección de incendios forestales.* Madrid : Departamento de física, Unversidad Carlos III de Madrid, 2002.
2. **Headquarter, Yole Développement.** *Uncooled Infrared Imaging Technology & Market Trends Report.* 2013.
3. [http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico). [En línea]  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico).
4. **Jr, R. R. Hudson.** *Infrared system engineering.* 1969.
5. *Introduction to infrared and electro-optical system.* **Drigger, R.G.** s.l. : Artech House, 1999.
6. *Tesis doctoral "Teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante Espectrorradiometría Ftir".* **Briz Pacheco, Susana.** Madrid : s.n., 2001.
7. **Holst., G.C.** *Holst,s Practical Guide to Electro-Optical Systems.* 2003.
8. *New method for on-line microbolometer detector nonuniformity correction.* **Olbrych, B. Wiecek and R.** Budapest, Hungary : s.n., 2009. In 16th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry.
9. **Instruments, National.** Intrudición a Labview. [En línea]  
<http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/esa/>.
10. *Labview Grafical programming.* **Jhonson, G.W.** s.l. : MaGrow-Hill, 2006.
11. **(SCD), Semi Conductor Device.** *Bird 384 datasheet.*
12. **Optronics, Ophir.** *210mm Motorized lens.*
13. **Instruments, National.** DAQ multifunción de bajo coste, NI USB-6008. [En línea]  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201986>.
14. **(SCD), Semi Conductor Device.** *BIRD 384/640 User Guide.* 2009.
15. **MODTRAN.** *User´s Manuel Modtran 5.2.*

16. **byrnes, J.S.** *Unexploded Ordance Detection and Mitigation*. s.l. : Springer, 2009.
17. **Boreman, E. L Dereniak and G. D.** *Infrared detectors and systems*. Nueva York : s.n., 1996.
18. **Holst, G.C.** *Electro-Optical Imaging System Performance*. s.l. : SPIE Press, 2000.

# 9. Anexo I: Presupuesto económico



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
Escuela Politécnica Superior

## PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: Manuel Rodrigo Morales Merchán

2.- Departamento: Física

### 3.- Descripción del Proyecto:

- Título: Integración Hardware y Software de Nuevos Procedimientos de Medida Remota mediante Imagen Espectral Infrarroja.  
- Duración (meses): 12 meses  
Tasa de costes Indirectos: 20%

### 4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

Euros

### 5.- Desglose presupuestario (costes directos)

#### PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) <sup>a)</sup>	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
		Ingeniero Senior	1	4.289,54	0,00	
		Ingeniero	12	2.694,39	4.289,54	
		Ingeniero	1	2.694,39	32.332,68	
					2.694,39	
					0,00	
Hombres mes 14				Total	39.316,61	

#### EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable <sup>d)</sup>
Sensor	20.000,00	30	6	36	1.000,00
Ordenador	1.300,00	60	6	36	130,00
Optica 210mm	6.000,00	50	4	60	200,00
Optica 35mm	700,00	50	2	60	11,67
Otros componentes camera	2.500,00	50	1	60	20,83
					0,00
Total					1.362,50

<sup>d)</sup> Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

#### SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Fabricación carcasa		200,00
Total		200,00

#### OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO<sup>d)</sup>

Descripción	Empresa	Costes imputable
Material fungible		600,00
Total		600,00

### 6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	39.317
Amortización	1.363
Subcontratación de tareas	200
Costes de funcionamiento	600
Costes Indirectos	8.296
Total	49.775

## 10.Anexo II: Detector Infrarrojo



### BIRD 384 Wide Band



**384x 288, 25  $\mu\text{m}$  pitch, VOx Microbolometer**

**Description**  
BIRD384 WB is based on the standard BIRD 384 x 288 uncooled detector, modified to provide simultaneous response in both MWIR (3-5  $\mu\text{m}$ ) and LWIR (8-14  $\mu\text{m}$ ) atmospheric windows. This novel feature provides an excellent opening for a wide range of new applications of microbolometer detectors.

**Applications**

- Coggles
- Rifle sights
- Unattended Sensors
- Miniature Payloads
- Airborne EVS
- Security and mid range Surveillance
- Fire fighters



**Main Features**

- Wide band (3-5 $\mu\text{m}$  and 8-14 $\mu\text{m}$ ) response
- Configurable format (384x288 or 320x240)
- "Power Save" and "TEC-less" operation ready
- On UFPA, residual non uniformity prediction feature

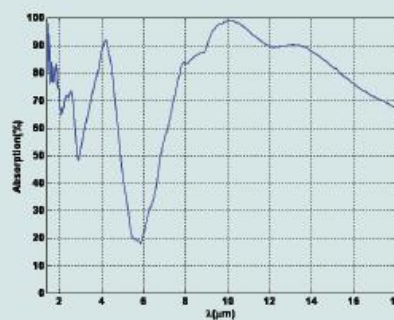




### Typical Specification (@ 25C, TEC stabilized)

PARAMETER	PERFORMANCE
Detector Type	BIRD384 - WB
Technology	VOx Microbolometer
Array Format	384 x 288 or 320 x 240
Pixel Pitch	25µm
Spectral Bandwidth	3-5µm and 8-14µm
Pixel Operability	B.T. 99.5%
Nominal Operating Temp.	25 °C (TEC stabilized)
Frame Rate	60 Hz
Voltage	5 Volts Max
Intra-scene Dynamic Range @ f/1	> 100 K (selectable gain levels)
Signal Responsivity @ f/1	>15 mV/K (selectable)
NETD@ 300K scene, f/1.0, 60 Hz	< 50 mK @10msec time constant
UFPA Temperature Sensor	On chip
Operating Temperature	-40 to +70 C

Specifications are subject to changes without further notice



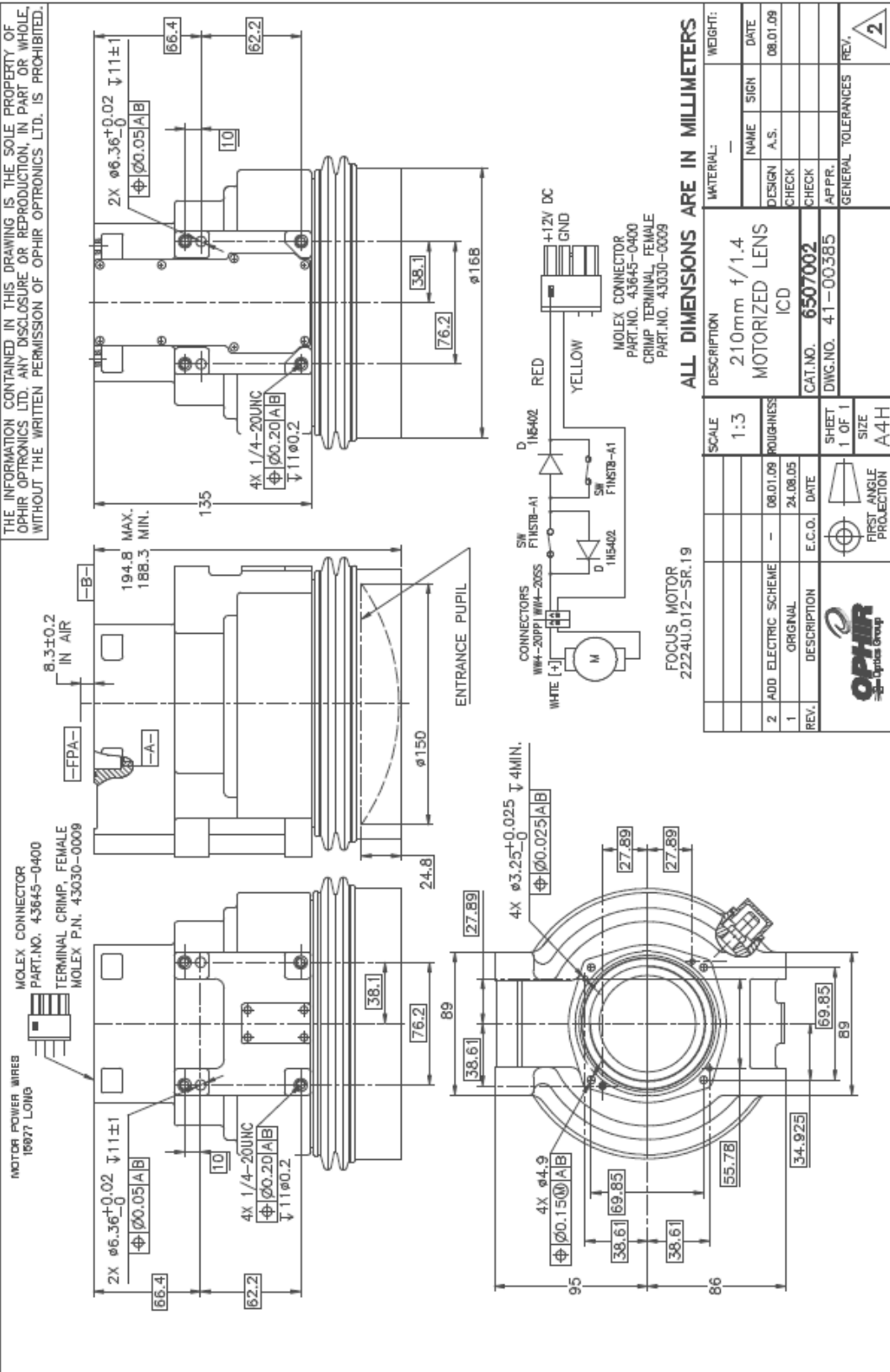
www.studio3.co.il

SCD/UNC/26783



• P.O. Box 2250, Haifa 31021 Israel • Tel: (+972)-4-9902535 9902500  
• Fax: (+972)-4-9902627 • e-mail: marketing@scd.co.il • Web: www.scd.co.il

# 11.Anexo III: Óptica 210mm





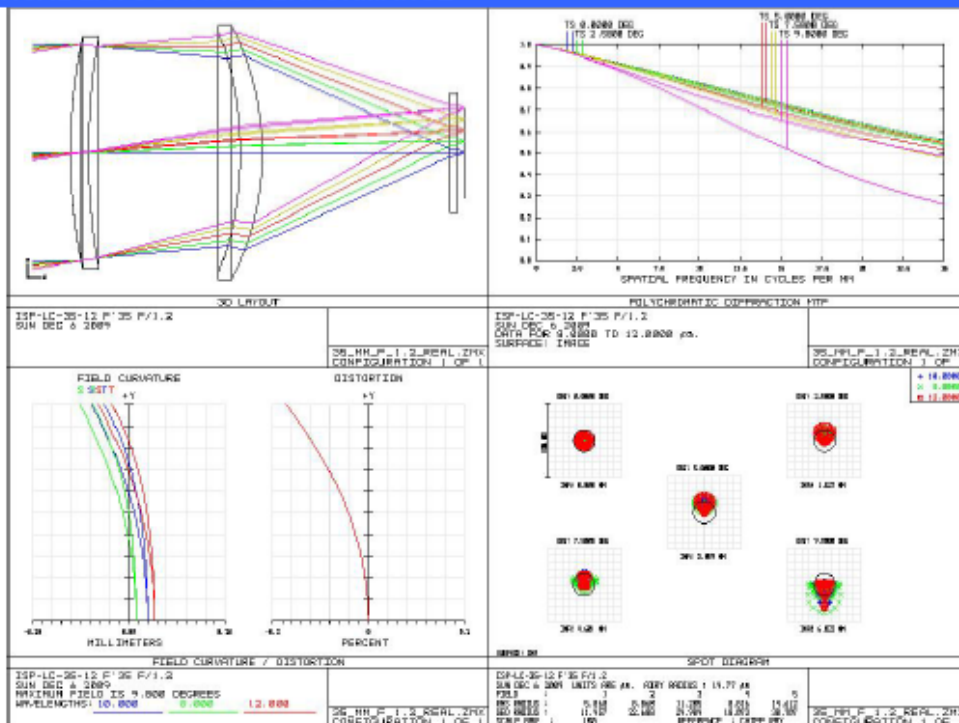
# 12.Anexo IV: Óptica 35mm

## ISP-TILK-35-12

LWIR 35mm F/1.2  
Thermal Imaging Lens Kit

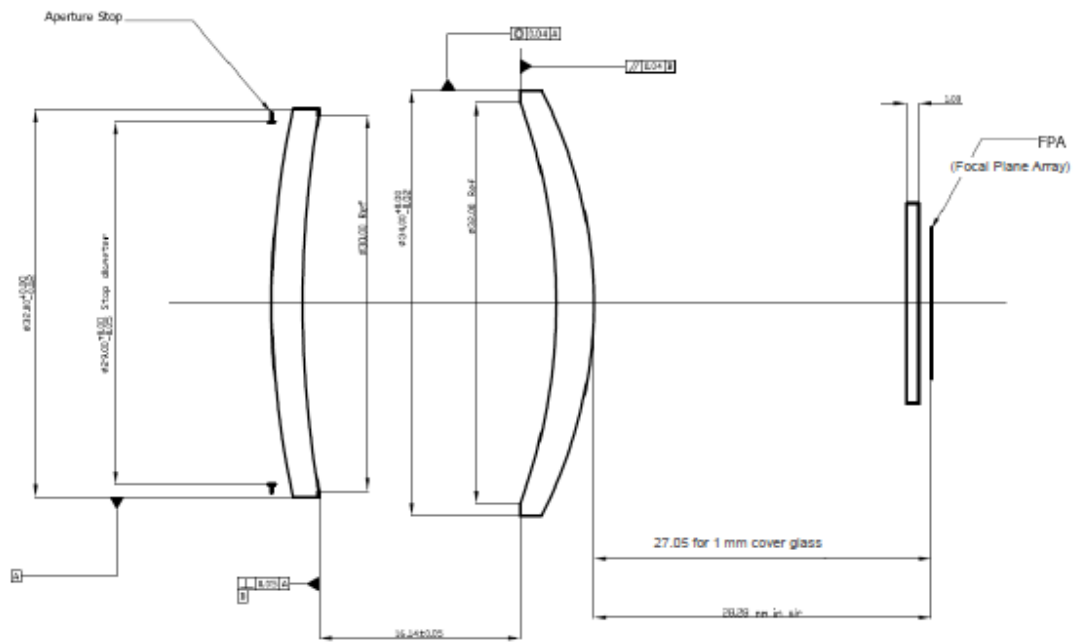
## White Paper

PARAMETER		VALUE	NOTES
Main	Sub		
OPTICAL			
Focal Length / F#		35 / F1.2	Nominal values
Detector (FPA) type / size		Up to 388x 284 pixels x 25 u or 640 x 480 pixels x 17 u	Up to 13.6 mm diagonal
Average Transmission		96% or 88%	Depends on front surface coating (AR or DLC)
Spectral Range		8-12 microns	
FOV (deg)		15.6°(H) x 11.74° (V)	For 9.6 x 7.2 mm detector size
Optical Coatings		High efficiency AR coating	Front element with DLC upon request
Optical Total Lens Track Length		Approx. 57.8 mm	Nominal
Optical Back Focal Length		Approx. 27.0 mm	Nominal to FPA with 1mm Ge cover glass
Minimum Focus Distance		3 meters	+/- 0.3 mm shift of module required
OPTICAL LAYOUT AND PERFORMANCE			





## MECHANICAL LAYOUT



Weight of Optical Elements	Approx. 23 grams	Nominal Value
Operating Temperature Range	- 20 ° C to + 50 ° C	

### ISP Optics Corporation, USA

1 Bridge Street, Irvington, New York 10533, USA Tel: +1 914 5913070, sales@ispoptics.com

### ISP Optics Infrared Design, Israel

133 HaRotem Street, Rinateya 73165, ISRAEL Tel: +972 (0)50 4456597, info@rp-optical-lab.com